



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA – GUATE SUR CIRCUITO I DE 230 KILOVOLTIOS

Erwin Armando Girón Girón

Asesorado por: Inga. Isabel López Tohom

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE
TRANSMISIÓN ESCUINTLA – GUATE SUR CIRCUITO I DE 230
KILOVOLTIOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y LA ESCUELA
DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
POR

ERWIN ARMANDO GIRÓN GIRÓN

ASESORADO POR: INGA. **ISABEL LÓPEZ TOHOM**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MESTRIA EN ENERGIA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

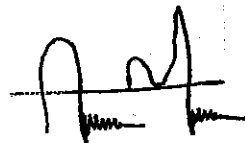
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR MSc.	Ing Murphy Olympto Paíz Recinos
EXAMINADOR MSc.	Ing Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR MSc.	Ing Pablo de León Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magali Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA – GUATE SUR CIRCUITO I DE 230 KILOVOLTIOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado en Energía y Ambiente, con fecha de octubre de 2016.



Erwin Armando Girón Girón



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO


Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2016-077

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA - GUATE SUR CIRCUITO I DE 230 KILOVOLTIOS"** presentado por el Ingeniero en Eléctrica Erwin Armando Girón Girón, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO

Guatemala, noviembre de 2016.



Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-077

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA - GUATE SUR CIRCUITO I DE 230 KILOVOLTIOS"** presentado por el Ingeniero Eléctrico Erwin Armando Girón Girón, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, noviembre de 2016

Cc: archivo/la

Dorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-077

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"CALIDAD DE POTENCIA ENERGÉTICA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA - GUATE SUR CIRCUITO I DE 230 KILOVOLTIOS"** presentado por el Ingeniero en Eléctrica Erwin Armando Girón Girón, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, noviembre de 2016

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.

Mis padres

Jesús María Girón Cabrera y María Hortensia Girón Bedoya. En su memoria serán siempre mi inspiración.

Mi esposa

Elvira de la Luz Rosa de Girón. Por ser una importante influencia y bastón mágico en mi carrera.

Mis hijos

Carlos y Oliver. Por ser dos ejes que activan mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante casa de estudio que me acogió en los años de mi carrera.
Facultad de Ingeniería	Por ser el hogar del saber que influenció en mi estudio y vida profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN	XI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN.....	XII
1. PRINCIPIOS BÁSICOS	1
1.1. Eficiencia eléctrica.....	1
1.2. Transmisión en líneas eléctricas.....	3
1.3. Fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia.....	5
2. DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	9
2.1. Variación de voltaje e interrupciones	10
2.1.1 Sobre voltajes transitorios.....	11
2.2. Ondas de armónicos fundamentales.....	11
2.4. Variaciones de voltaje en tiempo largo.....	12
3. PROBLEMAS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE POTENCIA.....	13
3.1. Conductor, aterrizamiento, configuración de la línea, efecto térmico y ambiental	14
3.2. Generación interconectada.....	17
3.3. Interferencia por conexión de equipos.....	19

4.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS	25
4.1	Obtención de parámetros.....	25
4.2	Resultados.....	26
4.3	Análisis de parámetros obtenidos.....	28
4.3.1	Cálculo de estadística descriptiva.....	30
4.4	Discusión de resultados.....	44
4.5	Gráfica de los resultados	48
4.6.1	Comparación de gráficas de las subestaciones.....	48
CONCLUSIONES.....		73
RECOMENDACIONES.....		75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		77
ANEXOS.....		79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ac Diagrama de un sistema eléctrico.....	4
2.	Configuración de una línea aérea de transmisión	7
3.	Fotografía de la línea de transmisión de 230 kv.....	17
4.	Diagrama unifilar de la línea de transmisión	23
5.	Diagrama vectorial de una línea de Transmisión.....	29
6.	Frecuencia mínima.....	32
7.	Diferencia de potencia total máxima activa	37
8.	Los mismos valores que la figura 7 con fondo oscuro.....	38
9.	Línea de transmisión sobre fotografía satelital.....	39
10.	Desbalance de voltaje máximo de secuencia negativa	42
11.	Potencia reactiva fase C con diferencia día 16 marzo de 2013.....	43
12.	Voltaje promedio RMS, Fase A.....	50
13.	Diferencia de voltaje promedio RMS. Fase A.....	50
14.	Voltaje promedio RMS. Fase B.....	51
15.	Diferencia de voltaje promedio RMS Fase B.....	51
16.	Voltaje promedio RMS Fase C.....	52
17.	Diferencia de voltaje promedio RMS Fase C.....	52
18.	Voltaje entre fases A-B	53
19.	Voltaje entre fases B-C	53
20.	Voltaje entre fases C-A	54
21.	Corriente máxima RMS. Fase A.....	54
22.	Diferencia corriente máxima RMS. Fase A.....	55
23.	Corriente máxima RMS. Fase B.....	55
24.	Diferencia corriente máxima RMS. Fase B.....	56

25.	Corriente máxima RMS. Fase C.....	56
26.	Diferencia corriente máxima RMS Fase C.....	57
27.	Potencia máxima activa fase A.....	57
28.	Diferencia potencia máxima activa fase A.....	58
29.	Potencia máxima activa fase B.....	58
30.	Diferencia potencia máxima activa fase B.....	59
31.	Potencia máxima activa fase C.....	59
32.	Diferencia potencia máxima activa fase C.....	60
33.	Potencia aparente fase A.....	60
34.	Diferencia potencia aparente fase A.....	61
35.	Potencia aparente fase B.....	61
36.	Diferencia potencia aparente fase B.....	62
37.	Potencia aparente fase C.....	62
38.	Diferencia potencia aparente fase C.....	63
39.	Potencia reactiva máxima fase A.....	63
40.	Diferencia potencia reactiva máxima fase A.....	64
41.	Potencia reactiva máxima fase B.....	64
42.	Diferencia potencia reactiva máxima fase B.....	65
43.	Potencia reactiva máxima fase C con diferencia.....	66
44.	Factor de potencia mínima fase A.....	67
45.	Diferencia de factor de potencia mínima fase A.....	67
46.	Factor de potencia mínima fase B.....	68
47.	Factor de potencia mínima fase C.....	68
48.	Frecuencia total.....	69
49.	Demanda total.....	69
50.	Diferencia demanda total.....	70
51.	Corriente total desbalanceada secuencia cero máx.....	70
52.	Corriente total desbalanceada secuencia negativa máxima.....	71

TABLAS

I.	Resumen los límites de cargabilidad permanente y de emergencia.....	19
II.	Capacidad de transformación para línea de 230/69 Kv.....	21
III.	Promedios de cada día de la potencia total en Kw.....	30
IV.	Cálculo del valor medio de las subestaciones.....	30
V.	Análisis de diferencia de potencia total máxima activa de los valores obtenidos con los equipos instalados en los extremos de la línea en Kw	33

GLOSARIO

- Voltaje** Es la medición de una fuerza electro móvil o la diferencia potencial que pone en movimiento a cada electrón, cuya unidad es el voltio. (The Dranetz-BMI Field Handbook for, Power Quality analysis. McGrawHill.2003, p.282).
- Sobre voltaje** **(overvoltage)** Roger C.Dungan,Mark F.McGranaghan. Surya, & Santoso.H. Wayne Beaty señalan que “Es un Incremento en el valor del voltaje promedio en corriente alterna, mayor del 110 por ciento a la frecuencia de sistema para una duración de 1 minuto”. (Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill. 2012. p. 19).
- Bajo voltaje** **(undervoltage)** Roger C. Dungan ,Mark F Mc. Granaghan. Surya, & Santoso H. Wayne Beaty Señalan que “Es el decremento en el valor del voltaje promedio en corriente alterna, menor del 90 por ciento a frecuencia del sistema para una Duración mayor de 1 minuto”. (Electrical Power Systems Quality.McGrawHill. 2012. p. 19).
- Fluctuación voltaje** En el XVIIIIMEKO World Congress. Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik, Croatia. “Se describe como una variación cíclica del voltaje en curso o una serie de casuales cambios de Voltaje”.

(Fundamentals of Electrical Power
Quality Assessment. June 22-27, 2003,
P.554).

Corrientes eléctrica “Se define como corriente eléctrica al movimiento de cargas eléctricas a través de un medio conductor o a lo largo de un circuito”. (Grupo Pandora S.A. 2001, p 10).

RMS, (rms) “Raíz cuadrada media es un proceso de cálculo para formas de onda de corriente y voltaje alternos”. (En The Dranetz-BMI Field Handbook for, Power Quality analysis. McGrawHill.2003, p.282).

Variación de voltaje

en larga duración Es considerada ser de larga duración cuando se excede los límites para tiempos mayores a 1 minuto, de la norma:((ANSI C84.1).

Variación de voltaje

en corta duración Roger C. Dugan, Mark F. Mc Granaghan, Surya Santoso .H. Wayne Beaty indicaron que “Esta variación con base a la clasificación de la IEC, entra en la disminución súbita de voltaje o también en una corta interrupción. Estas variaciones pueden ser llamadas como instantáneas, momentáneas o temporales, dependiendo de su duración, pueden estar entre 0.5 ciclos a 1 minuto” (Electrical Power Systems Quality. New York, Mc.Graw Hill. 2012 pag.3)

Disminución**(Dips o Sags)**

Roger C. Dugan, Mark F. Mc Granaghan, Surya Santoso H. Wayne Beaty indicaron que “Es un decremento entre 0.1 0.9 pu. En voltaje o corriente en rms a frecuencia del sistema para una duración de de 0.5 ciclos a 1 minuto” (*Electrical Power Systems Quality*. New York, Mc.Graw Hill. 2012, p.20).

Elevación**(Swells)**

RogerC.Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso.H. Wayne Beaty. “Se define como un incremento de voltaje o corriente entre 1.1 y 1.8 pu. En rms (microsegundos) en frecuencia del sistema para una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto”. (*Electrical Power Systems Quality*. New York, Mc.Graw Hill. 2012. p.23).

Desbalance**de voltaje**

Roger C.Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso.H. Wayne Beaty. “Se define algunas veces como la desviación máxima del promedio de corrientes y voltajes trifásicos dividido por el promedio de corrientes y voltajes expresado en porcentaje” (*Electrical Power Systems Quality*. New York, Mc.Graw Hill. 2012 p.24).

Estabilidad

De American Standard Definitions of Electrical Terms, ASA-CV42-1941 “Cuando se refiere a un sistema de potencia, es aquella atribución del sistema o parte del sistema, en la cual es capaz de desarrollar fuerzas de restauración entre los elementos involucrados, iguales o

mayores que las fuerzas que provocan el disturbio, para poder restaurar un estado de equilibrio entre los elementos”.

Potencia

eléctrica total Es la energía eléctrica que se transfiere por una línea de transmisión, cuya unidad de medida es el Watts, que equivale a un Joule por segundo. También se le llama potencia aparente (KVA) y vectorialmente se puede definir como la suma de potencia activa medida en KiloWatts (KW) y potencia reactiva medida en Kilovoltios reactivos (KVr).

Potencia activa Es la potencia necesaria para realizar trabajo útil como para la iluminación o energía para el movimiento de bombas de agua. se expresa en Kilowatts. (Kw).

Potencia aparente Vectorialmente, es la suma del vector de potencia activa y el de la potencia reactiva.

Factor de potencia A la razón entre la potencia Activa (Kw.) con la potencia reactiva (KVAR), se le conoce como factor de potencia, es en realidad una medida de eficiencia, ya que su proximidad a la unidad, implica que se tiene la máxima relación de eficiencia entre dichas potencias. La ecuación que defina esta relación de potencia es:

$$(kva)^2 = (kw)^2 + (Kvar)^2$$

Y el factor de potencia es: $FP = KW / KVA = \cos \phi$

RESUMEN

Roger C.Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso.H. Wayne Beaty. Se le llama calidad de potencia a “Cualquier problema de potencia que se manifieste en desviaciones de voltaje, corriente y frecuencia que resulte en falla o en baja operación del equipo del usuario”, (Electrical Power Systems Quality. New York, Mc.Graw Hill 2012 pag.3)

Para el presente trabajo, la calidad de potencia es cualquier manifestación de desviación de voltaje, corriente y frecuencia que resulte fuera de valores normados o impliquen pérdidas relevantes, entre los extremos de una línea de transmisión, considerando una de ellas punto inicial del flujo eléctrico y la otra su punto final, y para dar respuesta al objetivo principal del tema se tiene que la línea si tiene aún buena calidad de transmisión de potencia energética, con una eficiencia del 99.90 %, a pesar de 50 años de servicio, del medio ambiente por donde se transporta su energía y las interconexiones que en ella interfieren y entre los objetivos específicos se puede interpretar en que la fase C tiene diferencia marcadas respecto a las otras fases, resultado por el tipo de configuración existente en la línea de transmisión, afectando principalmente a los valores de voltaje.

Las figuras de diferencia de corriente máxima rms, son semejantes entre sí, en lo que respecta a su comportamiento en las 24 hrs; además tienen un seguimiento de comportamiento, igual a la potencia reactiva de las 3 fases: A, B y C, esto debido a que se conserva el comportamiento de la carga horaria del sistema eléctrico interconectado. De las potencias máximas activa las fases A y B, tienen valores mayores en Escuintla que en el extremo de Guate Sur, ya que en la fase C, la potencia activa es mayor en Guate Sur que en Escuintla, esto

debido también al tipo de configuración de la línea. El porcentaje de la corriente total desbalanceada de secuencia cero indica que existe un mayor desbalance en el extremo de Guate Sur que en Escuintla, pero este no sobre pasa el 5%, recomendado por las normas.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El trabajo consistirá en comparar valores obtenidos de parámetros como: voltajes, corrientes, factor de potencia, potencia activa, potencia aparente, potencia total y frecuencia en los extremos de la línea de transmisión de 230 kilovoltios, que se encuentra entre las subestaciones de Escuintla y la subestación de Guatemala Sur. La primera se ubica a orillas de la ciudad de Escuintla a una distancia de 60 kilómetros desde la ciudad capital de Guatemala y la otra subestación se encuentra en la población de San José Villa Nueva, municipio del Departamento de Guatemala a una distancia de 14 kilómetros y entre ellas existe una distancia de 49 kilómetros que es la distancia de la línea de transmisión circuito I.

Lo que se pretende con esta comparación de parámetros eléctricos obtenidos en tiempos simultáneos en los extremos del circuito I de dicha línea es: conocer las pérdidas que se producen en la línea de transmisión, comparar los resultados con valores normados que rigen en Guatemala, conocer la calidad de potencia a un extremo de la línea de transmisión y calcular la eficiencia energética de dicha línea.

Los valores se obtendrán por medio de dos equipos de marca: Dranetz, cuya característica principal consiste en grabar valores de parámetros eléctricos, como: voltajes, corrientes, factor de potencia, frecuencia, potencia y energía; además tiene la característica de poderse programar para grabar los valores de acuerdo a lo que el técnico así lo requiera y para el caso de este estudio, se programaron con tiempos simultáneos para comparar los extremos de la línea de transmisión; luego a los valores obtenidos se les encuentra su diferencia y con métodos estadísticos se logrará conocer el comportamiento actual de la línea y

así comparar los parámetros en ambos extremos para luego encontrar su eficiencia energética.

OBJETIVOS

General

Determinar la calidad de **potencia energética** del transporte de energía eléctrica de la línea de 230 kilovoltios Escuintla - Guate Sur, Circuito I, describiendo con base estadística, los resultados de las pérdidas de energía existentes.

Específicos

1. Identificar por medio de estadística descriptiva y sobre posición de gráficos, los disturbios que pudieran tener los parámetros eléctricos como: voltaje, corriente, frecuencia, potencia, obtenidos.
2. Determinar si los valores comparados de voltaje, corriente, frecuencia y potencia obtenidos están dentro de las normas eléctricas que actualmente rigen en Guatemala.
3. Describir la eficiencia energética de la línea, mediante la identificación de las pérdidas y sus causas.
4. Determinar si existe periodicidad en los disturbios de parámetros eléctricos, siempre con los datos obtenidos con el equipo especial en un periodo de 7 días y un intervalo de tiempo de cada 10 minutos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está prestando alta atención a temas referente a la eficiencia energética, dentro del cual toma alta importancia lo referente a energía eléctrica ya que son sistemas eléctricos que han estado sirviendo a la humanidad desde su invención.

El presente trabajo se desarrolla sobre el tema de eficiencia energética, en lo que respecta a una línea de transmisión eléctrica de 230 kilovoltios, específicamente sobre el circuito I de la línea de transmisión “Escuintla – Guate Sur”. Se instalaron equipos en los extremos de la línea, para recabar datos de los parámetros eléctricos necesarios y hacer la evaluación de pérdidas del transporte de energía, los cuales fueron evaluados en un periodo de 7 días de grabación de datos, cada diez (diez) minutos, simultáneamente en los extremos de la línea y empleando el método descriptivo y correlacional, se llega a determinar la eficiencia de la línea.

En el capítulo I de este trabajo se presenta el significado de la eficiencia energética, lo que es una transmisión de energía eléctrica y la configuración de la misma, luego en el capítulo 2 se da una descripción de los fenómenos eléctricos en líneas de transmisión, como sobre-voltaje transitorio y en tiempo largo. En el capítulo 3 se trata el tema de los problemas que afectan la calidad de potencia, tales como conductor, aterrizamiento, configuración de la línea, efecto térmico y ambiental. En el capítulo 4 se realiza un análisis de valores obtenidos y se tiene un bloque de graficas obtenidas para el día 16 de marzo de 2013, como un ejemplo de los 7 días de información recabada.

Finalmente se tienen las conclusiones y recomendaciones del trabajo entre las cuales la más importante es que la eficiencia energética esta aún dentro del rango de: “muy buena calidad” y además se recomienda mejorar la potencia reactiva en la subestación de Guate Sur y emplear programas adecuados para una óptima operación de la línea de transmisión.

1. PRINCIPIOS BÁSICOS

1.1 Eficiencia eléctrica

Se tiene la necesidad urgente de mantener la eficiencia energética de los sistemas eléctricos que sirven a la humanidad, los cuales pueden ser de eficiencia energética en generadores de energía eléctrica, en líneas de transmisión y líneas de distribución, así como existe eficiencia energética en edificios, empresas, industrias y todo aquel macro o micro sistema de aprovechamiento energético.

Por lo que, con mantener eficientes los sistemas de energía, existirá menos consumo de la materia prima que los distintos tipos de generadores de energía eléctrica emplean para la producción eléctrica y en forma directa existirá una menor contaminación al medio ambiente.

El estudio de la calidad de energía es muy importante, tanto para los factores técnicos como para los factores económicos, entre los cuales se puede mencionar los siguientes:

- Aumento de la vida útil de los equipos electrónicos de las subestaciones.
- Mayor eficiencia en los equipos electrónicos lo cual conlleva mayores índices de confiabilidad y operación.
- Menores riesgos de falla, lo cual aumenta la seguridad en el transporte de energía y disminuye los riesgos de aperturas de líneas o incluso apagones generales del Sistema de Transporte de Energía.
- Disminución de costos por mantenimiento
 - Disminución de riesgos de multas y demandas.

“La eficiencia energética se puede definir como la reducción en el consumo de energía eléctrica, sin sacrificar nuestro confort, calidad de vida y protegiendo el medio ambiente, por medio de equipos de mejor calidad y/o tecnología”.[Http://www.eficiente.com/uploadspublicaciones/ficheros/c66cfge36567e080f8a47adc9e827f02.pdf](http://www.eficiente.com/uploadspublicaciones/ficheros/c66cfge36567e080f8a47adc9e827f02.pdf) empresa.

En nuestro caso la eficiencia, consiste en relacionar los valores de entrada o sea los obtenidos en la Subestación de Escuintla, con los obtenidos en la subestación de Guate Sur, o sea los valores recibidos o de salida, esto se realiza empleando la relación siguiente:

$$\text{Eficiencia} = \text{valor de salida} / \text{valor de entrada}$$

Donde la salida es la cantidad de energía consumida por el proceso y entrada es la cantidad de energía que se utiliza como entrada para efectuar el proceso. Esta relación se aplicará para los casos de: voltaje, corriente y las potencias obtenidas.

Como resultados preliminares, se podrá comparar la pérdida de potencia que se produce en la línea de transmisión, ya que el paso de corriente, por un conductor de metal siempre produce pérdidas que se transforman en calor. También se podrá conocer los efectos que puedan presentarse durante 7 días de tomas de datos de parámetros eléctricos, en los cuales se conocerán las formas de curvas de demanda de carga que transfiere la línea, de un extremo a otro.

Se conocerá el efecto capacitivo que la tierra produce a las tres fases de la línea, con base a los datos recabados y grabados en los equipos instalados y saber que tanto contribuye este efecto, con la variación del potencia en los extremo de la línea.

¿Qué es calidad de potencia?

Roger C.Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso.H. Wayne Beaty
“Cualquier problema de potencia que se manifieste en desviaciones de voltaje, corriente y frecuencia que resulte en falla o en baja operación del equipo del usuario”, (Electrical Power Systems Quality. New York, Mc.Graw Hill. 2012 pag.3)

Aplicando al caso referido para el presente trabajo, la calidad de potencia sería: cualquier manifestación de desviación de voltaje, corriente y frecuencia que resulte fuera de valores normados o impliquen pérdidas relevantes, entre los extremos de una línea de transmisión, considerando una de ellas punto inicial del flujo eléctrico y la otra su punto final.

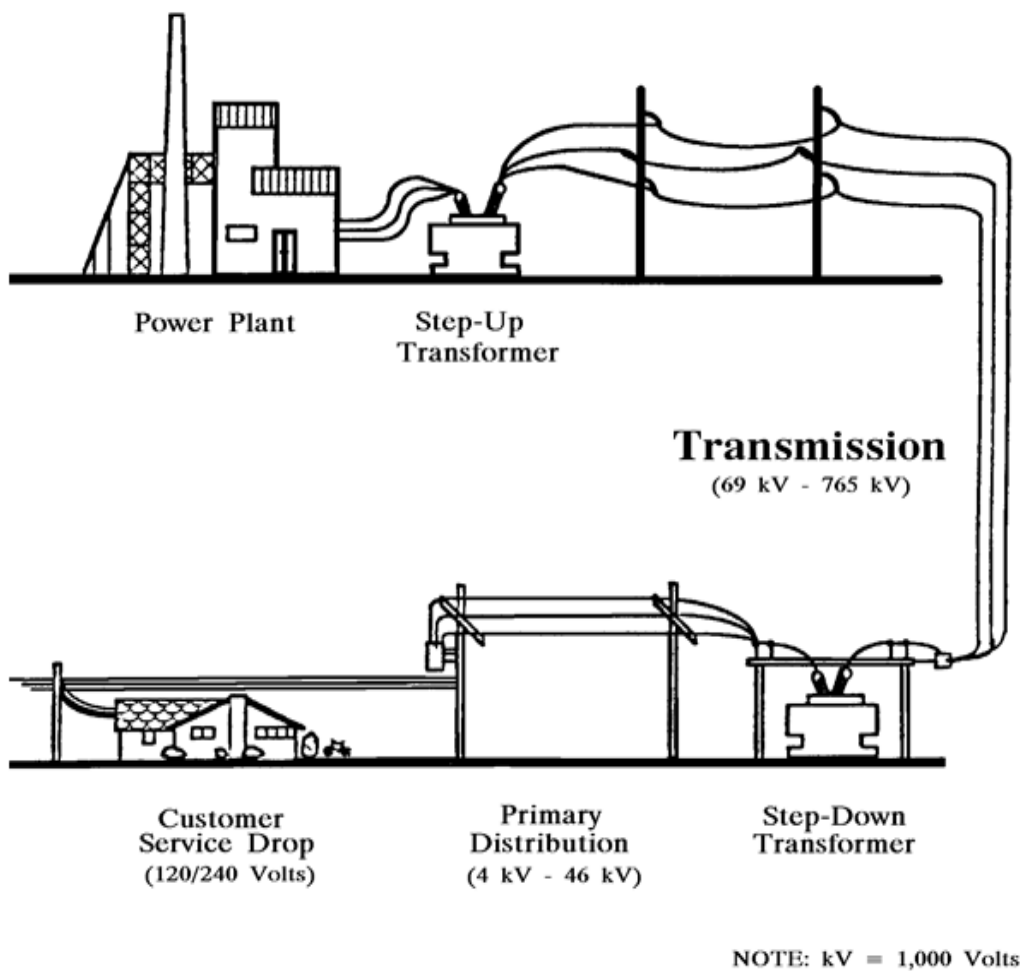
1.2. Transmisión en líneas eléctricas

Cuando se produce energía eléctrica a través de algún tipo de planta generadora, debe ser trasladada a los centros de consumo, por lo que el medio que se utiliza es la línea de transmisión eléctrica, que son cables colocados sobre soportes libres de contacto como torres o postes de concreto y están adecuadamente sostenidos para no hacer contacto con ningún objeto ajeno a su especial aislamiento.

La energía eléctrica que es generada, y cuyos niveles producidos deben ser transformados, elevándose su nivel de tensión o voltaje al cual va hacer transportado, lo cual se hace considerando que para un determinado nivel de potencia a transmitir, al elevar la tensión o voltaje se reduce la corriente que circulará en el conductor y esto lo hace más accesible técnicamente y económico su transporte; con este fin se instalan subestaciones elevadoras, en las cuales dicha transformación se efectúa empleando transformadores o autotransformadores. De esta manera, una red de transmisión emplea

usualmente voltajes del orden de: 69, 138 y 30 kilovoltios y superiores, denominados super- alta tensión de: 400, 500, 750 kilovoltios.

Figura 1. **Diagrama de un sistema eléctrico desde su generación hasta su punto final del usuario.**



Fuente: Electric Transmission Line, Public service Commission of Wisconsin.(pp.2, 2013).

Variables independientes o magnitudes fundamentales

Las magnitudes fundamentales que se van a calcular en el presente trabajo son tensiones, corrientes y frecuencia como variables independientes. A estas magnitudes le llamaremos señales, así tendremos señales de tensión y señales de corriente. Estas señales se tomaron directamente de la Subestación de Escuintla y la Subestación de Guate Sur, están constituidas por valores de tensión, de corriente, frecuencia y otras como potencias y factor de potencia, que variarán con el tiempo, cuya representación dará lugar a una curva que obedecerá a una función más o menos compleja.

Ondas transitorias

A la forma de esa curva, es a lo que llamaremos forma de onda de la señal transitoria.

1.3. Fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia

Gdynia Maritime University, Department of Ship Electrical Power Engineering, Gdynia, Poland, “Los fenómenos Electromagnéticos que tratan con a calidad de potencia eléctrica en sistemas de ingeniería, deben ser analizados en estado estable y no estable”.(2012, pág. 552).

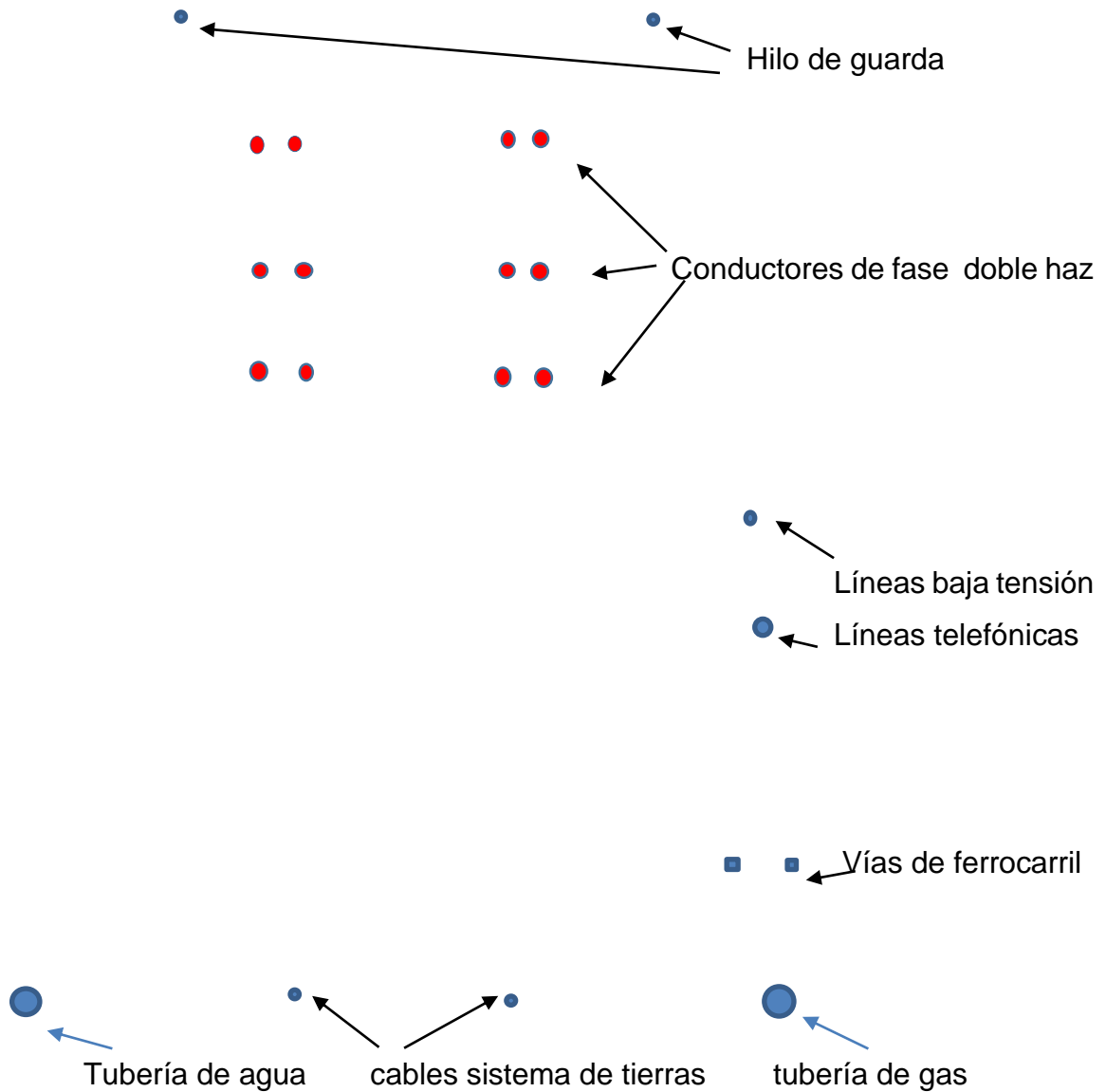
El ambiente electromagnético creado por las líneas de transmisión de potencia es bastante complejo, ya que intervienen diferentes factores como la disposición geométrica de los conductores y sus retornos por tierra. Los campos creados a la frecuencia nominal de 60 Hz son los predominantes en cuanto a magnitud y duración, aunque en la línea de potencia circulan otras corrientes con frecuencias armónicas que también producen campos electromagnéticos, por lo que los campos electromagnéticos creados por líneas de transmisión se

clasifican como campos de extra baja frecuencia (Extremely Low Frequency, ELF), por sus siglas en inglés.

Existen otros tipos de fuentes dentro de la misma línea de transmisión que producen campos electromagnéticos en otros anchos de banda, por ejemplo, corona en líneas de transmisión.

El uso de corredores comunes para líneas de transmisión de potencia y otros sistemas de transmisión huéspedes (cables de telecomunicaciones, tuberías de gas, vías de ferrocarril, etcétera) pueden tener problemas debido al acoplamiento electromagnético. En la figura 2 se muestra una línea aérea de potencia de doble circuito y los sistemas a los que se les pueden inducir corrientes.

Figura 2. **Configuración de una línea aérea de transmisión con doble circuito y los sistemas donde puede inducir corrientes.**



Fuente: <http://www.iie.org.mx/publica/bolja98/hugoja98.htm>
[artículos/técnicosBoletin](#) Hugo Pérez Rebolledo, Moisés Zavala Silva y Arturo Galván *Diego.IIE*. Julio – agosto 1998.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las corrientes que circulan en los conductores de fase son la fuente de los campos magnéticos creados alrededor de las líneas de transmisión. Estas corrientes tienen una variación estadística, considerando la magnitud y duración, que depende de la fluctuación de la carga durante el día. El retorno por tierra de las líneas de potencia y el sistema de transmisión huésped, forman un lazo con un área efectiva, por la cual existe un flujo magnético neto variable en el tiempo. Esto resulta en un voltaje magnéticamente inducido en el lazo, a consecuencia de la ley de Faraday, donde el voltaje inducido depende de la densidad de flujo magnético, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$Fem = d\phi / dt$$

Dos de los factores importantes en la creación del campo magnético a nivel de tierra son: la ubicación de las trayectorias de circulación de retorno por tierra y sus magnitudes de corriente.

Las líneas de transmisión producen un campo magnético de baja frecuencia asociado con las corrientes en los conductores. Si se conocen las corrientes en los conductores es posible calcular el campo magnético usando la ley de Biot-Savart, la cual establece que el campo magnético en un punto p debido a una diferencia de corriente $I dl$, es directamente proporcional al producto de la corriente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r entre el punto y la corriente. Esta ley se puede expresar matemáticamente como:

$$H = \int (I \, dl \times a_l) / 4 \pi r^2$$

La densidad de flujo magnético en el ambiente del derecho de vía compartido en este circuito de la línea, con la finalidad de obtener los límites máximos a los que se ven sometidos los sistemas huéspedes (como pueden ser las tuberías enterradas), en este caso, no tiene más que la propia línea y el circuito No.2 para un cálculo del campo magnético se debe obtener por cada fase de la línea involucrada; la contribución de cada corriente de fase se suma al campo magnético total por superposición.

En el cálculo de la densidad de flujo magnético se involucran las características magnéticas del medio, en este caso del aire y de la tierra. Las líneas de fuerza magnética varían con la distancia a la fuente (la línea de transmisión), por lo que la magnitud del flujo magnético variará, aumentando con la altura sobre el nivel de tierra.

<http://www.iie.org.mx/publica/bolja98/hugoja98.htm> artículos/técnicosBoletín

2.1. Variación de voltaje e interrupciones

La carga está continuamente en cambios y el sistema de potencia está continuamente ajustándose a estos cambios. Todos estos cambios y ajustes resultan en las variaciones del voltaje a los cuales se refieren como: “*variaciones de voltaje en larga duración*”, estos pueden ser de bajo-voltaje o sobre-voltaje, dependiendo de las condiciones del circuito específico. Las características del voltaje en estado estable se expresan mejor en la recopilación de datos y análisis estadístico. Dentro de las características importantes se incluye la magnitud del voltaje y su desbalance. La distorsión armónica es también una característica del estado estable del voltaje, pero esta característica es tratada separadamente porque no envuelve variaciones en la componente de frecuencia fundamental del voltaje. Fundamentals of Electrical Power Quality Assessment. XVII IMEKO

World Congress Metrology in the 3rd Millennium. June 22-27, 2003.P- 2, Dubrovnik Croatia.

Las interrupciones de voltaje son los casos más severos por su impacto en lo que respecta la continuidad de la potencia, en una línea de transmisión estas interrupciones se dan en tiempos largos y sus causas pueden ser naturales como caídas de árboles o ramas sobre una fase de la línea o por aperturas de la línea de cierta manera programadas.

2.1.1. Sobre voltajes transitorios

Los cambios de voltajes transitorios pueden determinarse cuando la magnitud de un pico de voltaje (variación brusca), excede de valores normados. El término transitorio es normalmente usado para referirse a cambios rápidos en los valores de voltaje y corriente de un sistema de potencia, transitorios son cambios dentro de la forma de onda de un ciclo.

Los eventos transitorios pueden ser divididos dentro de dos subcategorías: Transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios, dependiendo de sus características, o sea que los impulsivos son picos sobre o bajo los valores normados y los oscilatorios son rangos de valores sobre o bajo los valores normados. Los transitorios son normalmente caracterizados por la forma de onda, por ejemplo la introducción de un capacitor produce un pico o subida de voltaje.

2.2. Ondas de armónicos fundamentales

Idealmente una fuente de electricidad debería invariablemente presentarse como una señal de voltaje sinusoidal, en cualquier punto de la red del sistema, sin embargo, por varias razones en distintos puntos del sistema resulta difícil mantener las óptimas condiciones de las señales eléctricas. Por lo

que las deformaciones de las ondas de voltaje y corriente del tipo sinusoidal, se le conoce como una distorsión de onda a menudo conocida como distorsión armónica.

El término armónico se originó en el campo de la acústica, en la cual se relaciona a la vibración de una cuerda o una columna de aire a una frecuencia que es múltiple de la frecuencia base. Una componente armónica en un sistema de potencia de corriente alterna se define como la componente sinusoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia igual a un múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema. Armónicos en ondas de voltaje o corriente eléctrica, pueden ser concebidas perfectamente como componente sinusoidal de múltiplo de frecuencia de la frecuencia fundamental.

$F_h = (h) \times (\text{fundamental Frecuencia})$ Donde h es un múltiplo integrador.

Por ejemplo: la quinta armónica, sería la componente armónica de:

$$F_h = (5) \times (60) = 300 \text{ Hz.}$$

Fuente: Harmonics and Power Systems. Francisco C. de la Rosa, Distribution control System Inc. Hazelwood Missouri, USA. (p-2 2006).

2.3 Variaciones de voltaje en tiempo largo

Con base a la norma ANSI C4.1. Roger C. Dugan Mark F. McGranaghan. Surya Santoso & H. Wayne Beaty. "las variaciones de voltaje en un sistema de potencia en valores rms, (promedios), serán para valores mayores a un tiempo de 1 minuto, en la cual se considera una variación de voltaje en tiempo largo. Las variaciones de larga duración pueden ser en sobre-voltajes o bajo-voltajes, en los cuales generalmente no son el resultado de fallas en el sistema, pero son causadas por variaciones de carga en el sistema y operaciones de aperturas y cierres; tales variaciones son típicamente graficadas como voltajes versus tiempo". (Electrical Power Systems Quality. Mc. Graw Hill. pag.18. 2012).

3. PROBLEMAS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE POTENCIA

En forma general la calidad de potencia es afectada por una serie de factores que no se habían tomado en cuenta, sino que hasta en los años '80, la industria y la tecnología empezó a dar importancia al tema de la calidad de potencia. Por lo que, para conocer los problemas que afectan a la calidad de potencia se definirá primero el significado de: "*Calidad de Potencia*", a lo cual se tiene la definición de: Electrical Power Systems Quality. Roger C. Dugan Mark F. McGranaghan. Surya Santoso & H. Wayne Beaty. "Cualquier problema de potencia en voltaje, corriente o desviación de frecuencia, que resulta en una falla o baja operación en los equipos de los consumidores de energía" (Mc. Graw Hill. 2012 pag.3).

Para caso del presente trabajo se definirá la calidad de potencia como: "Cualquier disturbio de potencia en voltaje, corriente o desviación de frecuencia, que se produzca en la línea de transmisión y que difiera en los valores normados optados por el sistema de potencia".

Las líneas de transmisión de AC, (corriente alterna) están diseñadas para operar con voltaje sinusoidal a una frecuencia de 60 hertz (Hz) y magnitud de voltaje específico, por lo que cualquier variación significativa en la magnitud de la forma de onda de voltaje o frecuencia, es un caso de calidad de potencia de transporte en la línea.

Partiendo de un extremo de la línea de transmisión, que se considerará como el punto de inserción de energía a la línea o sea el punto en que se tiene el lado de la generación, en la cual se tiene el voltaje a una forma de onda perfecta y que luego pasa por los conductores dispuestos a efectos ambientales

y que la corriente pasa a través de una impedancia de la línea, que causa una variación de potencia al otro extremo de la línea.

3.1. Conductor, aterrizamiento, configuración de la línea, efecto térmico y ambiental

Conductor

“Los cables conductores constituyen los elementos que transportan la energía eléctrica. La sección, composición de estos y número de conductores por fase, debe ser suficiente por una parte, para permitir la conducción de la potencia eléctrica con gradiente de potencial aceptable y por otra para resistir los esfuerzos mecánicos que se presenten”. de: Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión, Centro de Actualización Profesional e Innovación Tecnológica del Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. (p-2, 14 al 18 mayo de 2001).

La línea de transmisión aérea de alta tensión consiste de tres conductores simples o doble haz, que contienen las tres fases del sistema de potencia. Los conductores son generalmente de aluminio con reforzamiento de acero (ACSR), o sea que el centro del cable tiene el acero y el aluminio de baja resistencia esta entorchado alrededor del acero.

Para el caso del presente trabajo el conductor empleado en la línea de transmisión es del tipo: Cable de aluminio con reforzamiento de acero. (ACSR), 477 Circular Mils, de 26 hilos trenzados de aluminio.

De Electrical Transmission and Distribution, Reference Book, By Central Station Engineers. East Pittsburgh, Pennsylvania. Valores obtenidos con diámetro por hilo de: 0.1355 plg. y de acero 7 hilos de 0.1054 plg. Diámetro total: 0.858 plg. Resistencia (ra). Ohms por conductor por milla de para 60 ciclos de:

0.196 Ohms. Reactancia inductiva Ohms por conductor por milla para 60 ciclos de: 0.430, y la reactancia capacitiva megOhms por conductor por milla, para 60 ciclos es de 0.0988" (1974 p.50).

Aterrizamiento

En adición a los conductores de cada fase, una línea de transmisión lleva también los cables de acero llamados cables de protección a tierra. Estos cables están directamente conectados a las torres que los soportan y luego son aterrizados al pie de la torre, por lo tanto, están a un potencial de tierra. Estos cables de tierra esta localizados en la parte superior de los conductores y también se emplean para protección contra rayos en épocas de tempestades.

Configuración de la línea

La línea de transmisión del presente trabajo contiene las siguientes características:

Voltaje de operación de 230 kilovoltios.

Derecho de vía de 40 metros.

Morfología del terreno: ondulado y montañoso.

Uso actual del terreno: cultivos de caña, cultivos de maíz y potreros.

Tipo de torre: Autosoportada.

Número de circuitos: dos.

Configuración de la línea: Vertical. (ver figura 2)

Número de conductores por fase: dos.

Tipo de material de los conductores: ACSR, (Aluminium Conductor Steel Reinforced).

Máxima temperatura del conductor 75° C.

Efecto térmico y ambiental

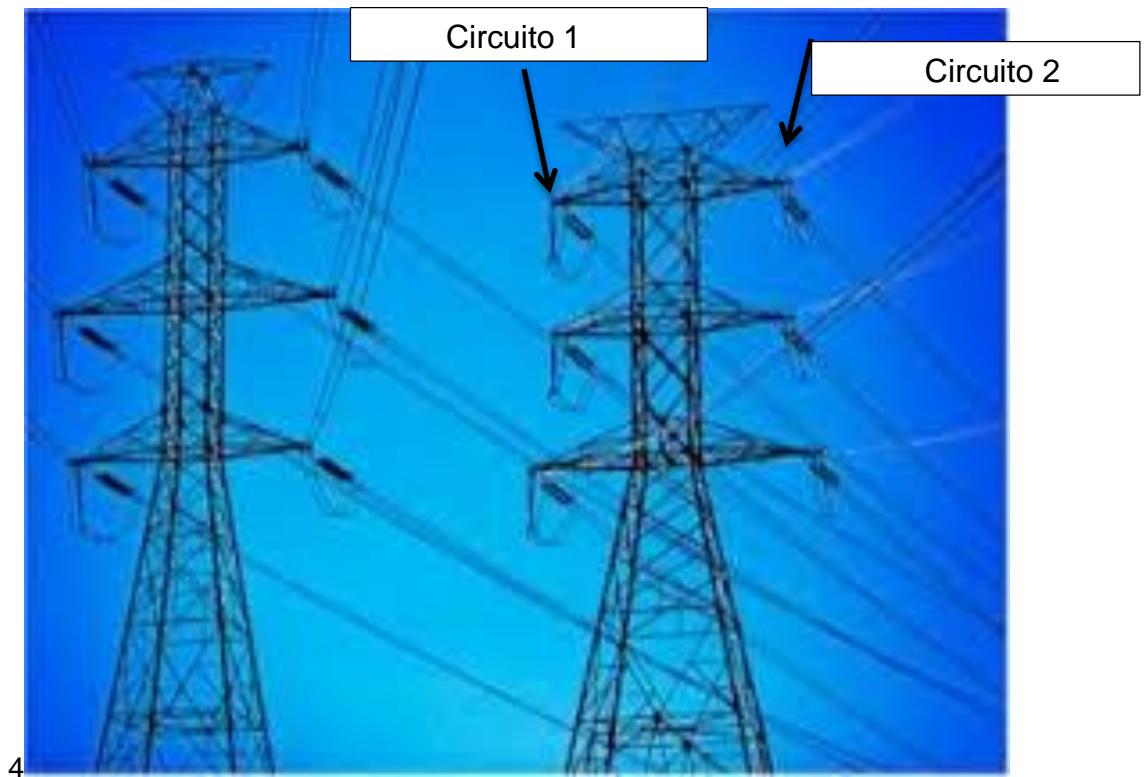
En diseño de líneas de Transmisión, el aumento de la temperatura del conductor en el medio ambiente en tanto está conduciendo corriente eléctrica, es importante, también es necesario considerar la capacidad máxima de corriente que puede llevar un conductor, este valor de máxima corriente es necesaria porque está determinada por la temperatura máxima de operación del conductor. Esta temperatura afecta la flecha (distancia vertical del punto más alto del conductor al punto más bajo, que resulta en un claro del conductor por su peso y la tensión dada) entre torres y postes y determina la pérdida del esfuerzo de tensión.

El efecto térmico en el conductor proviene de paso de corriente por el mismo y por los efectos del medio ambiente, principalmente por la temperatura ambiental, el viento y la contaminación esto en orden de prioridad; y como consecuencia de esto es la deformación del conductor y perdidas de la potencia en el transporte de energía eléctrica.

Para los conductores de aluminio como en el caso de este trabajo, existen curvas para estimación de la deformación plástica; pero es imposible determinar valores precisos para la deformación, ya que varían tanto con la temperatura, el viento y la contaminación ambiental, así como con la tensión y varían en forma continua durante la vida de la línea.

En lugares donde se quema la caña se ha constatado que: el incremento de temperatura y el humo provocan la apertura de las líneas de transmisión en la parte de mayor flecha del conductor, esto dependiendo también de la hora y la velocidad del viento que también influyen para que ocurra dicho evento.

Figura 3. **Fotografía de la línea de transmisión**



Fuente: elaboración propia, (2014)

Foto tomada desde la subestación de Escuintla por el autor de este estudio.

Configuración de la de la línea Escuintla – Guate Sur: circuito: 1 y 2

3.2. Generación interconectada

La interconexión del sistema de transporte de Energía eléctrica, que actualmente se encuentra operando en Guatemala, presenta una topología radial, siendo vulnerable ante la pérdida de uno de sus elementos y está creciendo de una forma radial, solamente para interconectar los proyectos nuevos de generación.

Para el caso del presente trabajo la generación que se interconecta a la subestación de Escuintla 1 y 2 en voltaje de 230 kv. Son:

Planta hidroeléctrica de Aguacapa.

Planta térmica de san Joaquin

Planta térmica Jaguar.

Planta térmica Carbonera.

Planta térmica Ducke Energy

Enron

La Esperanza

Las Palmas

Sidegua

Tampa

Arizona

San José

Del Manual de restablecimiento de la red de transporte, de la empresa de transporte y control de energía eléctrica (ETCEE), del Instituto Nacional de Electrificación. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Guatemala Las subestaciones Guatemala Norte, Guatemala Este, Guatemala Sur y Escuintla 1 son subestaciones de transformación desde las que se suministra aproximadamente un 62% de la demanda total del sistema. La subestación Escuintla 2 no cuenta con equipos de transformación, pero en ella se concentra una gran cantidad de generación instalada en la zona sur del país, entre las que destacan las plantas Enron (118.0 MW), La Esperanza (129.5 MW), Las Palmas (64.0 MW), Sidegua (38.0 Mw), Tampa (80.0 Mw), Arizona (164.0 Mw), Aguacapa (80.0 Mw) y San José (136 Mw). (noviembre de 2014. pág.52).

En la siguiente tabla se resumen los límites de cargabilidad permanente y de emergencia, así mismo la carga máxima y porcentaje de carga respecto al límite permanente de las líneas más importantes.

Tabla I. Circuito 1 de Escuintla – Guate Sur de 230 k. sobre pasan el 50% de su capacidad térmica.

nodo inicio	Nodo final	KV	Km	tasa A	tasa B	Carga máxima	% Cm/RA
Escuintla 1	Guate Sur	230	44,8	390.4	491.6	230	58.9

Fuente: Manual de restablecimiento de la red de transporte, de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE), del Instituto Nacional de Electrificación (INDE). Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Guatemala, (noviembre de 2014. pag.61).

3.3. Interferencia por conexión de equipos:

Equipo en que comprende las Subestaciones de Escuintla y Guate Sur.

Banco de tierra

Transformadores de potencial

Conexión en los transformadores

Transformador de potencia (PT's)

Transformador de corriente (CT's)

Banco de Capacitores

Pararrayos

Interruptores

Fusibles

Reactores

Interruptor de recierre o recloser

Cuchillas o seccionadores
Relevadores de protección
Interruptor de potencia o disyuntores

La calidad de potencia en el extremo de una línea de transmisión, está sujeta a variaciones ocasionada, tanto por las fuentes que suplen energía a la línea como los usuarios que se interconectan al sistema eléctrico, no es fácil identificar de donde viene la causa de la baja calidad de la potencia, si viene de los generadores a través de las subestaciones y las líneas de transmisión, si es resultado de la operación del Sistema o si puede venir de las cargas interconectadas o sea los usuarios.

Se tienen identificado varios equipos que dan como resultado una baja calidad en la calidad de potencia, entre los cuales se mencionan:

- Caída de voltaje debido a la impedancia de conductores.
- Efectos de variación de forma de ondas por luces fluorescentes.
- Variaciones de onda debido a la Introducción de bancos de capacitores
- Variaciones de voltaje debido a descargas electro atmosféricas.
- Dispositivos electrónicos que producen variaciones periódicas en las formas de onda del voltaje.
- Variaciones de voltaje por la conexión de cargas de fábricas de alto consumo, principalmente las que tienen altos procesos de hornos o soldaduras.
- Interconexión de generadores solares y generadores de viento.

Existen otros equipos que en mayor y menor forma interfieren en la modificación de la calidad de potencia del sistema eléctrico, en su mayoría en sistemas de baja tensión.

Según Plan de expansión del sistema de transporte 2008 – 2018. Elaborado por la División de proyectos estratégicos Según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. CNEE, en la tabla siguiente se presentan las cargas de los transformadores para la época seca y húmeda del año 2015, si no hay ninguna ampliación en la capacidad de transformación, por lo que, se considera que para que pueda estar con una capacidad adecuada de ese año, deben darse las ampliaciones de inmediato.

En el cuadro siguiente se observa la capacidad de transformación que en una proyección al año 2015 se tendrá para la línea de 230 kilovoltios transformando a 69 kilovoltios en las subestaciones de Guate Sur y en Escuintla, para tener una idea de los valores máximos de transformación y el porcentaje de carga que se tendrán.

Tabla II. Capacidad de transformación para línea de 230/69 kv.

Subestación	Transformación	Capacidad (MVA) y tipo	Año 2015 % de carga	
			Época húmeda	Época seca
Guate Sur A	230/69 kv.	150, 3x1PH	84.83	66.8
Guate Sur B	230/69 kv.	100, 1x3 PH	71.73	57.51
Escuintla I	230/69 kv.	67.5, 1X3PH	58.59	45.55
Escuintla II	230/69 kv.	100, 1X3PH	58.39	45.49

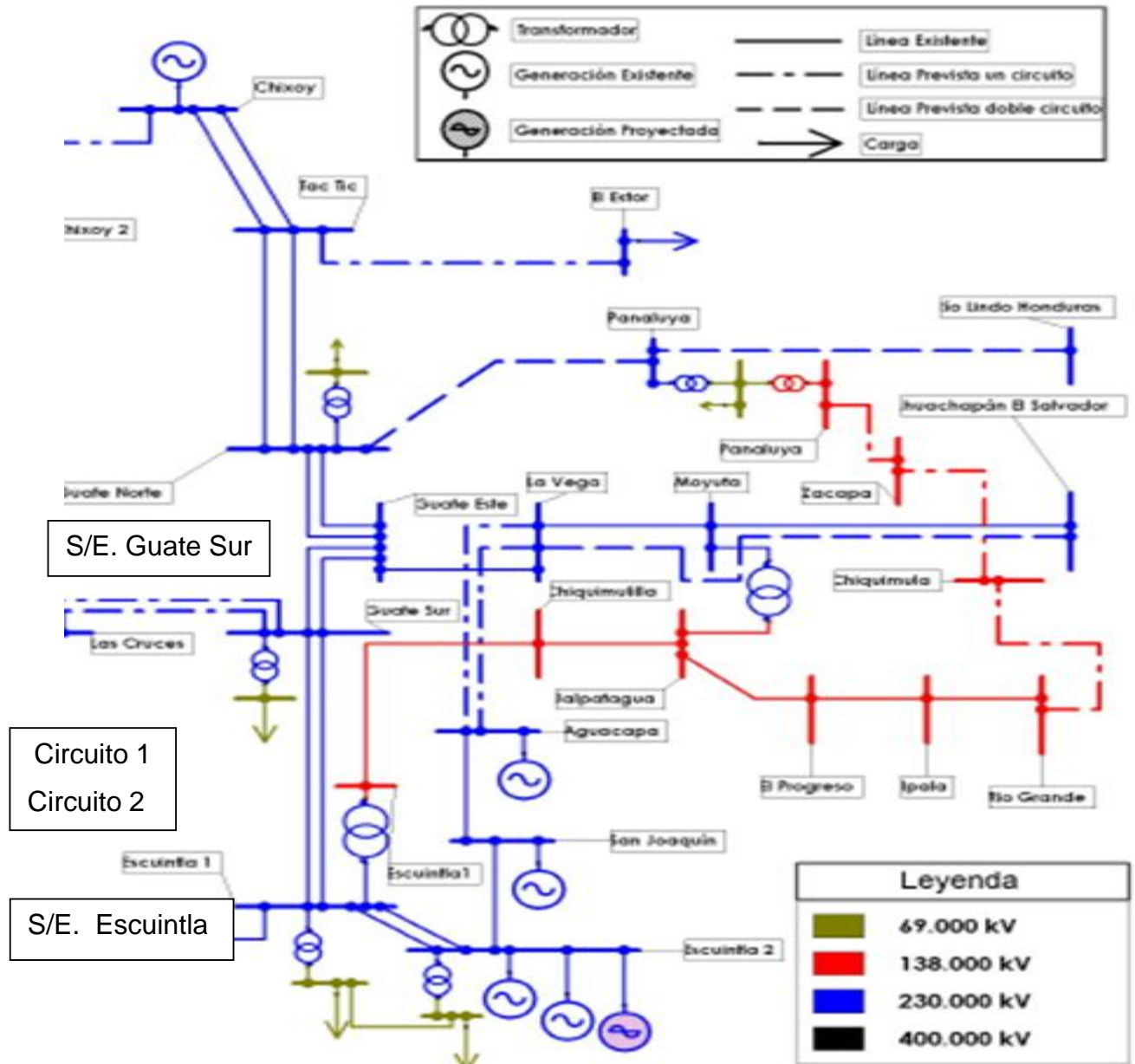
Fuente: Plan de expansión del sistema de transporte 2008 – 2018. Elaborado por la División de proyectos estratégicos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (pág.19 CNEE).

La máxima capacidad de transmisión de potencia, de la zona Pacífico a la zona Metropolitana, se calculó para el escenario de demanda en la época húmeda y seca, tal como se presenta en la tabla II, considerando dentro del estudio todas las obras que componen el Plan de Expansión del Sistema de Transporte. Las subestaciones que componen la zona pacifico son: Escuintla I, Escuintla 2, Palín, Pacífico, Aguacapa y San Joaquín, y las líneas de transmisión que conectan esta zona con el resto del sistema son: Palín – Las Cruces 230kV, Aguacapa – La Vega 2 230kV, Escuintla – GuateSur 230kV, Escuintla – Palín 138kV y Escuintla – Jurún Marinalá 138kV. Se consideró como criterio de seguridad operativa, que ninguna línea de transmisión sobrepase el 80% de su capacidad térmica, tomado de: *Plan de expansión del sistema de transporte 2008 – 2018*. Elaborado por la División de proyectos estratégicos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.(CNEE pág.21).

A continuación se presenta el diagrama unifilar de Subestaciones, generaciones y líneas de 230 kilovoltios del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Como puede observarse en el diagrama unifilar del sector sur, las líneas de 230 kilovoltios se encuentran situadas en una posición estratégica para el transporte de energía del sur hacia la industria y carga habitacional de la capital.

Figura 4. Diagrama Unifilar de la línea Escuintla – Guate Sur



Fuente: Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008–2018. De la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (CNEE). Pág.14

4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS

Al programarse los equipos que se emplearon los cuales son dos analizadores grabadores de datos eléctricos, marca DRANETZ 4400, que fueron proporcionados por el INDE, para realizar la toma de datos en las subestaciones de Escuintla y Guate Sur, específicamente en la línea de Escuintla a Guate Sur, Circuito I. Estos fueron programados para realizar la toma de datos simultáneos durante 7 días, cada diez (10) minutos; estas tomas empezaron hacerse del 15 de marzo de 2013 a las 18:30 horas. Para el 21 de marzo de 2013 a las: 15:30 horas. Se tomaron 7 días para terminar con un ciclo de una semana completa y detectar cambios entre los diferentes días de la semana, se tomaron cada 10 minutos para capturar cambios dentro de este rango y también no sobre cargar los equipos de información como lo recomienda el manual de los mismos.

4.1 Obtención de parámetros

Para fines de este trabajo se muestra a continuación los siguientes parámetros eléctricos que se obtuvieron del circuito I de cada día, así como su diferencia, que servirán para llegar a realizar el análisis de la calidad de potencia de la línea en mención.

- Promedios de los voltajes RMS
- Corriente máxima RMS
- Potencia máxima por cada fase y
- Potencia máxima total
- Potencia reactiva fundamental total
- Factor de potencia mínimo
- Frecuencia mínima
- Desbalance de voltaje de secuencia negativa máxima

- Desbalance de voltaje de secuencia cero máxima
- Demanda total
- Corriente total de desbalance secuencia negativa máxima
- Corriente total de desbalance secuencia cero máximas

4.2. Resultados

Se ha observado que cuando se tiene un voltaje aplicado a una carga lineal en este caso la carga de la línea de transmisión, si el voltaje decrece también la corriente decrece, esto de acuerdo a la ley de Ohm ($V = IR$), estando la resistencia de la línea constante. En la línea de transmisión se trata siempre de mantener el voltaje en un rango entre 230 kilovoltios, más o menos 10 kilovoltios, por lo que, en las gráficas se puede observar durante las 24 horas del día, que el voltaje varia en 4,500 valor máximo de voltios de fase a neutro, entre las subestaciones.

Las curvas del voltaje promedio de las fases A y B, se mantiene muy semejantes

En su comportamiento en las 24 horas, siendo el voltaje en Escuintla mayor que en Guate Sur, pero para la fase C, el voltaje en Guate Sur es mayor que en Escuintla; sin embargo, en las gráficas de corriente máxima RMS, existe una variación en las fases A y B de 6 y 5 amperios entre las 19:00 y 20:00 hrs. y únicamente en la fase C, la corriente es mayor en Escuintla con un valor máximo de 4 amperios, entre las 00:00 y 06:00 hrs. esto puede observarse en las figuras.11, 13 y 15, igual comportamiento se tienen para los 7 días analizados en este trabajo.

Estas observaciones se pueden interpretar en que la fase C tiene diferencias marcadas respecto a las otras fases, resultado por el tipo de configuración existente en la línea de transmisión, afectando principalmente a los valores de voltaje.

Además, las gráficas de diferencia de corriente máxima rms, son semejantes entre sí, en lo que respecta a su comportamiento en las 24 hrs además tienen un seguimiento de comportamiento, igual a la potencia reactiva de las 3 fases: A, B y C, esto debido a que se conserva el comportamiento de la carga horaria del sistema eléctrico interconectado.

De las potencias máximas activa las fases A y B, tienen valores mayores en Escuintla que en el extremo de Guate Sur, ya que en la fase C, la potencia activa es mayor en Guate Sur que en Escuintla, esto debido también al tipo de configuración de la línea; el mismo caso se observa en las potencias aparentes por fase, donde la fase B es la que más altos valores tiene que corresponden a la subestación de Escuintla y la fase C los tiene la Subestación de Guate Sur.

En lo que respecta la potencia reactiva máxima en las 3 fases A, B y C, de 00:00 hrs. A 05:00 hrs el extremo en Guate Sur presenta valores mayores que en Escuintla, así como de 19:00 hrs. A 00:00 hrs. Esto debido también al comportamiento de la demanda del sistema eléctrico y la configuración de la línea.

Sobre el factor de potencia de cada fase, estas cambian de valores +1 a -1, que suele ocurrir más entre un horario de 00:00 a 05:00 hrs. Con una diferencia entre los extremos de la línea de: 0.004 valores por unidad. “El factor de potencia en realidad una medida de eficiencia, cuando el factor alcanza la unidad el sistema está operando en máxima eficiencia”. Obtenido de: Importance of measurement: The Impact of Power Quality in Energy Efficiency. Tamer Qazi Sreemant Roy Energy Solutions Architect Power Quality Solutions Manager Schneider Electric. Dubai, United Arab Emirates página 3.

También se tiene una frecuencia mínima de 59.90 Hz con algunos picos mínimos de 59.87 Hz.

La demanda total de la línea se aproxima a 225 megawatts, produciéndose una diferencia de 300 kilowatts más, al extremo en Guate Sur, se observa también que de día la demanda es mayor en el extremo de la Subestación de Guate sur y de noche es mayor en el extremo de Escuintla, con un valor máximo de 1000 kilowatts más, para el lado de Escuintla.

El porcentaje de la corriente total desbalanceada de secuencia cero indica que existe un mayor desbalance en el extremo de Guate Sur que en Escuintla, pero este no sobre pasan el 5%. Sin embargo, la corriente desbalance total de secuencia negativa máxima, que existen picos de incremento que sobrepasan el 5% de valor llegando a 6.5%, y los demás valores están próximos al 4%.

4.3 Análisis de parámetros obtenidos

Para el análisis de este trabajo, se aplicará el circuito equivalente para una línea de transmisión corta, ya que dicha línea tiene una longitud de 44 kilómetros; haciendo caso omiso de la capacitancia, la línea puede expresarse como la siguiente expresión:

$$\mathbf{Z = R + jX = z s = r s + j x s}$$

Donde:

z = impedancia serie de un conductor en ohm por milla.

r = resistencia de un conductor en ohms por milla.

x = reactancia inductiva de un conductor en ohms por milla.

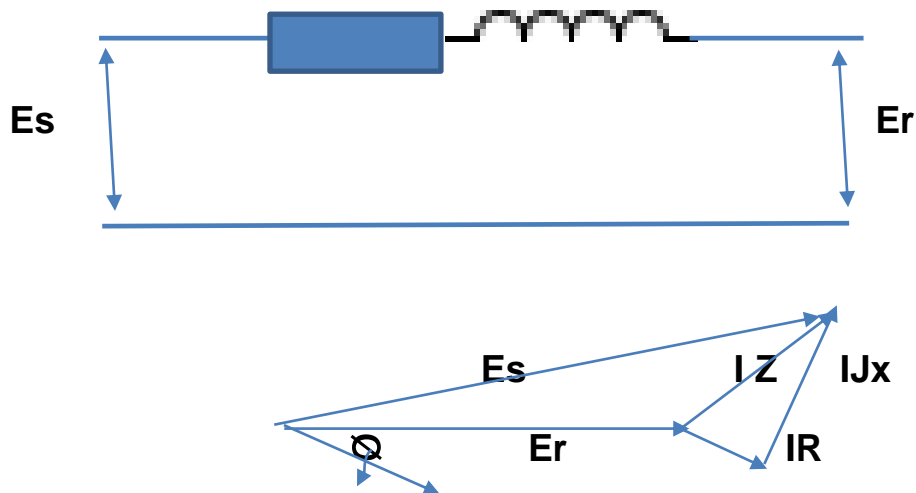
s = longitud de la línea en millas.

El diagrama correspondiente “por fase” del circuito es el siguiente y circuito equivalente

Figura 5. Diagrama vectorial de para una línea de transmisión corta

De donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z = R + jX$$



Fuente: elaboración propia (2015)

$$E_s = E_R + Z I$$

Todos los voltajes son tomados de línea a neutro, pero si se tomara el voltaje de línea a línea, la impedancia de la línea se deberá de multiplicar por: $\sqrt{3}$ para una línea trifásica.

Eficiencia energética

Eficiencia de la línea por su potencia total.

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{Potencia recibida}}{\text{Potencia de entrada}} \times 100\%$$

La corriente recibida es inversamente proporcional al factor de potencia, consecuentemente, cuando el F.P se aproxima a la unidad, la corriente y la eficiencia de la línea aumentan.

Para el caso de este trabajo, la potencia recibida está en Subestación Guate Sur y la entrada será en la Subestación de Escuintla.

Por lo tanto:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Pot. Guate Sur}}{\text{Pot. Escuintla}} \times 100 \%$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{186,812}{186,987} \times 100(\%)$$

$$\text{Eficiencia} = 99.90 \%$$

4.3.1. Cálculo de estadística descriptiva

A continuación se efectuarán cálculos estadísticos principalmente de los promedios de la potencia total en los extremos de la línea de los valores obtenidos con los equipos instalados.

Tabla III. **Promedios de cada día de la potencia total en Kw.**

Número días	Guate Sur Kilowatts	Escuintla Kilowatts	Diferencia Kilowatts
1	159,894.00	159,698	196
2	177,332.00	177,352	-20
3	179,756.00	179,838	-82
4	199,139.00	199,445	-306
5	199,862.00	200,244	-382
6	201,684.00	202,078	-394
7	190,013.00	190,254	-241
PROMEDIO	186,812	186,987	175

Fuente: elaboración propia (2016)

Tabla IV. **Cálculo del valor medio de las subestaciones**

Guate Sur	186,812	7	26,687.43
Escuintla	186,987	7	26,712.43

Fuente: elaboración propia (2016)

Valores medios son:

$$\text{Guate Sur } 26,687.43 = \bar{X}_{GS}$$

$$\text{Escuintla } 26,712.43 = \bar{X}_E$$

Cálculo de varianza:

n

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Siendo los valores de varianza de la Subestación de Guate Sur y Escuintla iguales a:

$$S_{\text{Guate Sur}} = 173,635.53$$

$$S_{\text{Escuintla}} = 173,816.74$$

Y el coeficiente de variación es:

$$CV_{GS} = 6.506266732$$

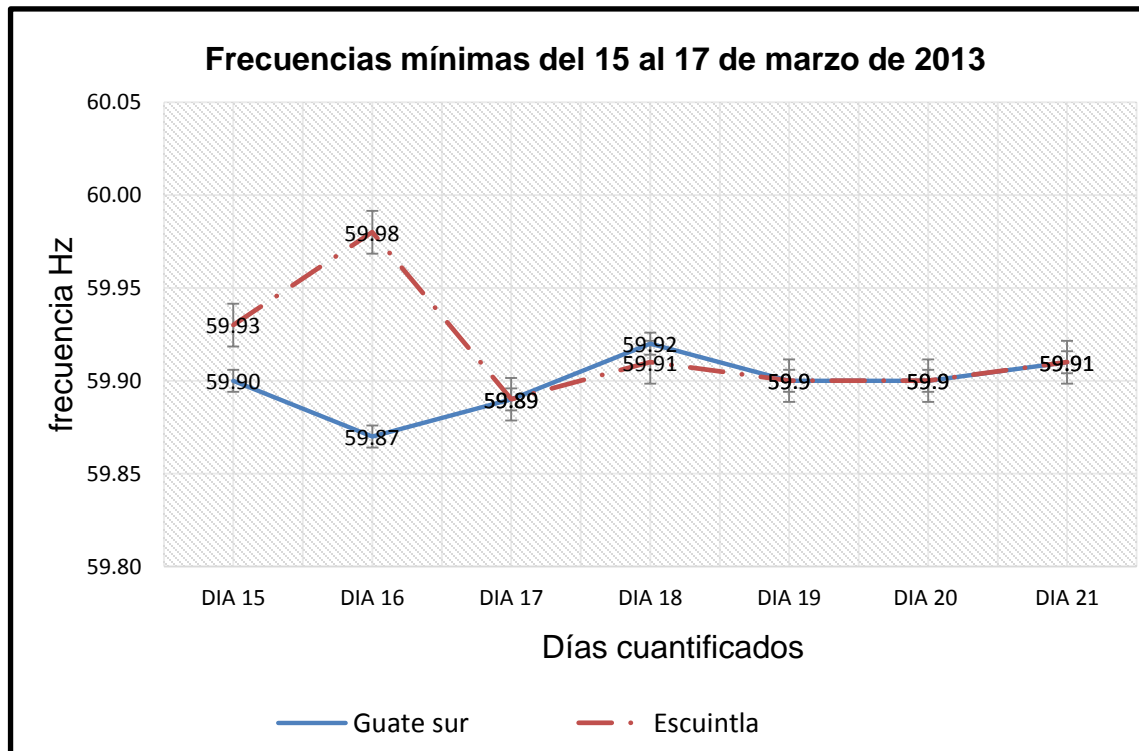
$$CV_E = 6.506961437$$

Como puede observarse en los resultados del coeficiente de variación no representa mucho la diferencia de un punto a otro, por lo que, se considera eficiente la transferencia de potencia de un punto a otro.

Se tiene aproximadamente 175 kilowatts, de pérdida total en la línea tomando como base los resultados de los datos obtenidos con los equipos instalados a cada extremo de la línea.

Se realizará un análisis de otro índice para conocer la calidad de potencia transmitida por la línea, para lo cual el índice importante es la frecuencia, que se promediaron los valores de cada día, tanto en el extremo de Escuintla como en el extremo de Guate Sur, cuyos valores pueden apreciarse en la figura N.5

Figura 6. Frecuencias mínimas



Fuente: elaboración propia (2016)

Se observa que la frecuencia mínima se dio en el extremo de Guate Sur con un valor de: 59.87Hz. Figura propia de este estudio. La máxima frecuencia en el extremo de Escuintla con un valor de 59.98Hz.

A continuación se muestran los valores y las gráficas con la diferencia de la potencia total máxima activa, en que se observan las variaciones de cada día y los picos o variaciones de potencia, que se registran en la línea.

Tabla V. Análisis de diferencia de potencia total máxima activa de los valores obtenidos con los equipos instalados en los extremos de la línea en Kw.

HORARIO DE TOMA DE VALORES	DEL DÍA 15 ABRIL 2013 lunes	DEL DÍA 16 ABRIL 2013 martes	DEL DÍA 17 ABRIL 2013 miércoles	DEL DIA 18 ABRIL 2013 jueves	DEL DÍA 19 ABRIL 2013 viernes	DEL DÍA 20 ABRIL 2013 sábado	DEL DÍA 21 ABRIL 2013 domingo
0:00		158	336	199	-104	62	-673
0:10		7	207	296	-90	46	-641
0:20		106	275	210	-13	-97	-652
0:30		691	297	328	-23	268	-620
0:40		171	289	180	49	-22	-581
0:50		468	355	336	21	46	-607
1:00		-375	336	256	42	29	-581
1:10		285	319	149	171	3	-579
1:20		531	397	368	149	51	-569
1:30		343	240	237	128	94	-621
1:40		277	416	405	59	32	-549
1:50		230	265	282	260	326	-600
2:00		311	279	289	98	168	-596
2:10		234	411	157	86	204	-616
2:20		247	351	297	81	-59	-596
2:30		55	350	439	61	-28	-588
2:40		157	427	261	94	221	-647
2:50		297	298	299	14	187	-555
3:00		67	468	171	75	80	-597
3:10		284	249	257	114	56	-587
3:20		396	375	356	146	-42	-590
3:30		178	349	317	53	173	-623
3:40		334	244	246	45	45	-654
3:50		404	280	290	169	37	-564
4:00		256	346	245	7	167	-554
4:10		222	356	277	130	-43	-598
4:20		226	254	326	47	40	-610
4:30		209	376	198	178	-51	-686
4:40		345	294	299	-183	-3	-652
4:50		228	322	160	15	40	-669

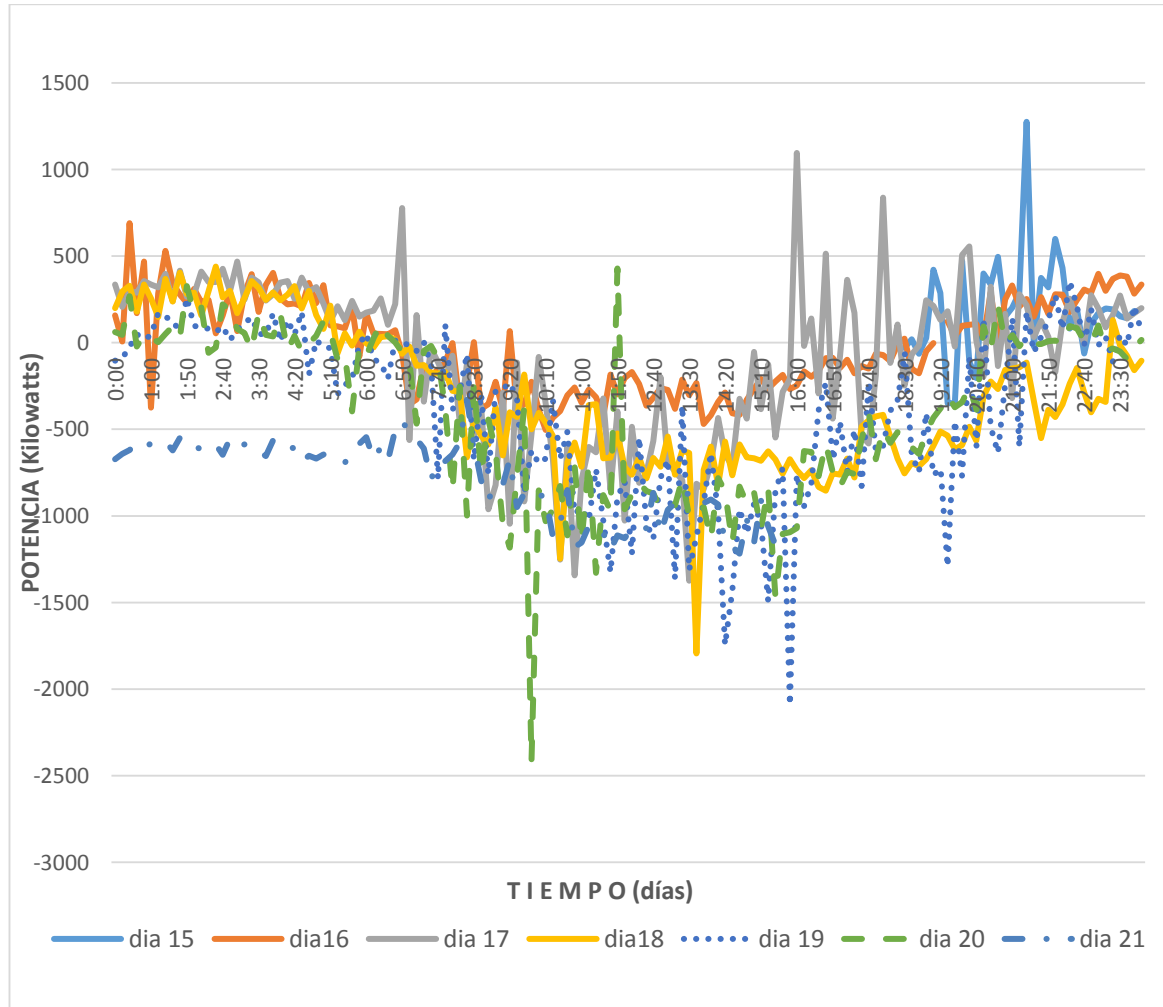
5:00		333	225	80	-23	123	-645
5:10		99	125	215	-32	64	-649
5:20		95	210	-61	-297	-99	-669
5:30		84	130	55	-243	-70	-692
5:40		205	241	-16	-211	-397	-640
5:50		-80	151	63	-7	-27	-583
6:00		169	175	-4	52	-77	-546
6:10		52	185	-27	-94	26	-672
6:20		50	256	32	-118	108	-606
6:30		48	104	38	-207	39	-678
6:40		73	224	17	12	1	-504
6:50		-64	777	-64	11	-53	-449
7:00		-355	-561	-23	-22	-113	-524
7:10		-328	160	-133	-48	-467	-556
7:20		-134	-341	-130	3	-48	-610
7:30		-191	-33	-173	-127	-18	-790
7:40		-155	-113	-179	-786	-91	-680
7:50		-112	-203	-169	105	-379	-683
8:00		-2	-74	-278	-389	-853	-646
8:10		-354	-454	-280	-281	-252	-576
8:20		-239	-121	-661	-65	-997	-329
8:30		3	-545	-454	-677	-235	-586
8:40		-382	-368	-539	-297	-760	-796
8:50		-355	-962	-588	-758	-443	-909
9:00		-225	-821	-373	-277	-623	-810
9:10		-388	-289	-651	-265	-1050	-820
9:20		67	-1046	-402	-232	-1183	-675
9:30		-382	-115	-430	-323	-768	-948
9:40		-355	-916	-183	-870	-374	-871
9:50		-225	-527	-500	-624	-2418	-846
10:00		-388	-82	-406	-696	-852	-878
10:10		-503	-351	-462	-669	-1031	-891
10:20		-433	-672	-539	-331	-964	-1121
10:30		-395	-1253	-1246	-671	-827	-1041
10:40		-303	-603	-689	-515	-1112	-851
10:50		-259	-1344	-577	-985	-710	-1180
11:00		-346	-795	-716	-956	-1146	-1155
11:10		-271	-602	-361	-1025	-695	-1058
11:20		-314	-632	-354	-731	-1329	-1099

11:30		-424	-322	-667	-1025	-879	-1098
11:40		-184	-851	-663	-1325	-971	-1196
11:50		-299	-397	-523	-893	429	-1112
12:00		-203	-1027	-718	-799	-961	-1128
12:10		-170	-485	-762	-1220	-874	-1075
12:20		-238	-809	-662	-547	-811	-1076
12:30		-363	-752	-783	-1039	-856	-1070
12:40		-319	-568	-666	-1132	-871	-867
12:50		-262	-198	-717	-780	-954	-1104
13:00		-272	-690	-541	-677	-928	-966
13:10		-382	-744	-762	-1363	-938	-925
13:20		-212	-792	-623	-364	-787	-934
13:30		-302	-1374	-637	-1313	-1005	-854
13:40		-233	-815	-1794	-1120	-992	-893
13:50		-469	-845	-734	-925	-948	-925
14:00		-418	-696	-600	-636	-1132	-905
14:10		-342	-434	-822	-983	-782	-935
14:20		-288	-648	-571	-1744	-858	-1151
14:30		-408	-710	-765	-1432	-1156	-1178
14:40		-416	-323	-588	-960	-831	-1217
14:50		-330	-439	-661	-1101	-928	-1021
15:00		-266	-53	-668	-931	-863	-1154
15:10		-210	-384	-681	-1038	-1077	-911
15:20		-266	-126	-627	-1492	-838	-1060
15:30		-223	-548	-674	-857	-1467	-1169
15:40		-186	-283	-756	-725	-1104	-1081
15:50		-267	-209	-673	-2092	-1094	
16:00		-248	1096	-736	-761	-1070	
16:10		-165	-19	-781	-943	-626	
16:20		-196	139	-736	-816	-630	
16:30		-162	-293	-832	-391	-770	
16:40		-90	514	-854	-233	-586	
16:50		-88	-439	-754	-676	-753	
17:00		-145	-80	-762	-456	-832	
17:10		-98	363	-669	-747	-746	
17:20		-176	172	-778	-504	-758	
17:30		-134	-538	-484	-827	-554	
17:40		-149	-582	-450	-223	-411	
17:50		-64	-188	-426	-624	-673	

18:00		-71	838	-416	-597	-501	
18:10		-105	-116	-542	-393	-579	
18:20		-12	106	-669	-332	-517	
18:30	-30	24	-248	-754	-58	-593	
18:40	19	-152	-68	-695	-648	-603	
18:50	-63	-177	-17	-713	-748	-641	
19:00	27	-50	245	-672	-406	-517	
19:10	422	-2	212	-595	-764	-433	
19:20	287		132	-513	-728	-378	
19:30	-350	123	181	-536	-1293	-303	
19:40	-350	37	-22	-614	-451	-372	
19:50	473	98	506	-590	-768	-344	
20:00	-110	103	556	-485	-83	-256	
20:10	-203	108	15	-566	-598	-387	
20:20	399	29	-197	-311	141	95	
20:30	335	291	323	-223	-485	-36	
20:40	496	-9	-135	-267	-636	216	
20:50	151	250	167	-157	-237	-2	
21:00	201	330	-320	-149	142	43	
21:10	289	209	280	-142	-599	-21	
21:20	1275	252	216	-114	180	29	
21:30	-22	150	32	-337	-54	-10	
21:40	374	264	125	-550	32	-7	
21:50	319	167	35	-388	130	9	
22:00	600	280	-171	-430	276	12	
22:10	433	278	119	-357	77	-6	
22:20	82	178	255	-236	355	96	
22:30	194	247	121	-146	211	84	
22:40	-62	306	-5	-288	-11	8	
22:50	112	289	274	-402	195	-5	
23:00	170	397	197	-324	-14	99	
23:10	198	299	89	-342	37	-45	
23:20	192	369	160	131	-109	-33	
23:30	152	388	272	-16	46	-51	
23:40	142	382	139	-75	-17	-94	
23:50	183	283	171	-158	211	-25	
24:00		336	199	-104	62	17	

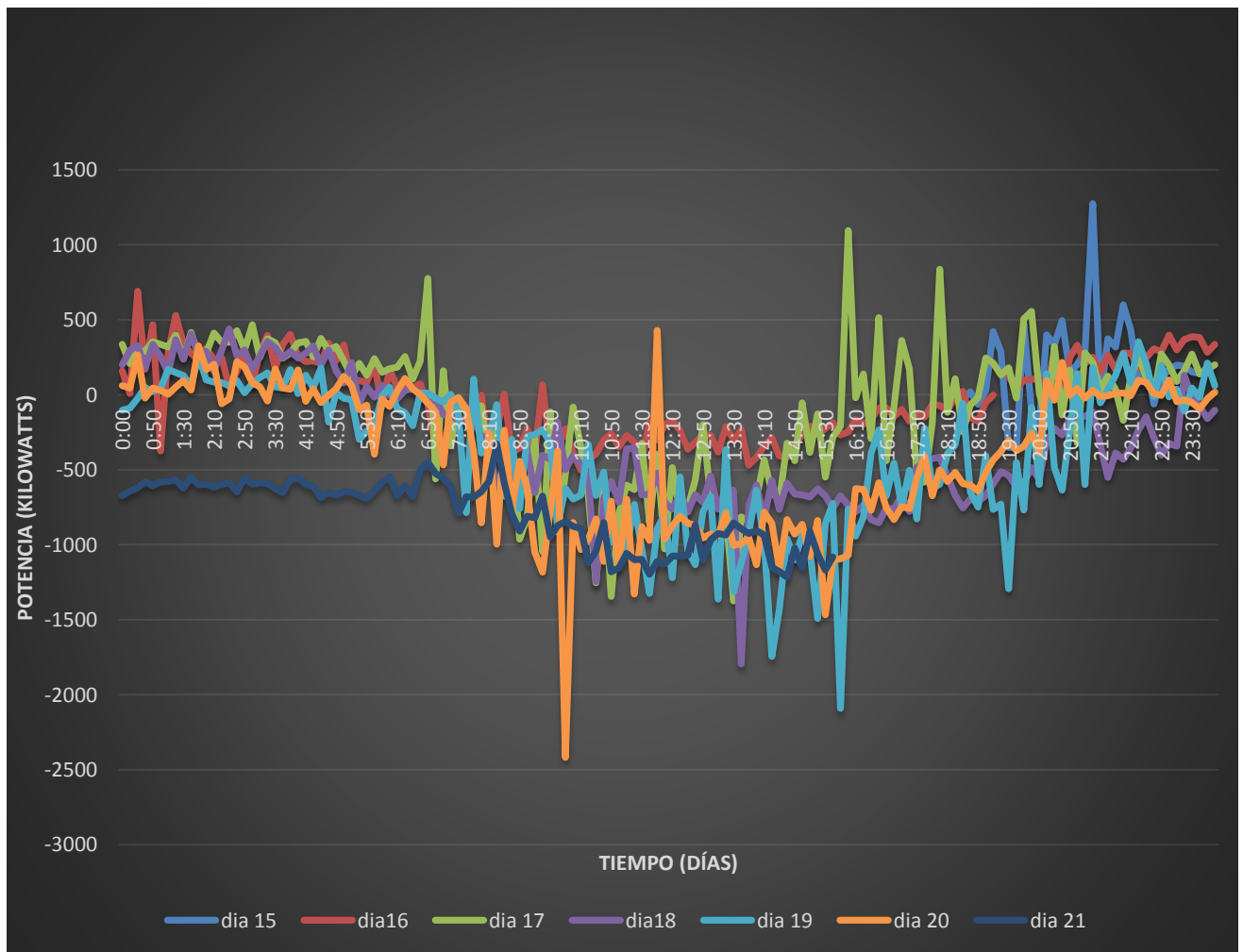
Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 7. Diferencia de potencia total máxima activa entre subestaciones de Guate Sur y Escuintla entre los días 15 al 21 de marzo de 2013.



Fuente: elaboración propia (2016)

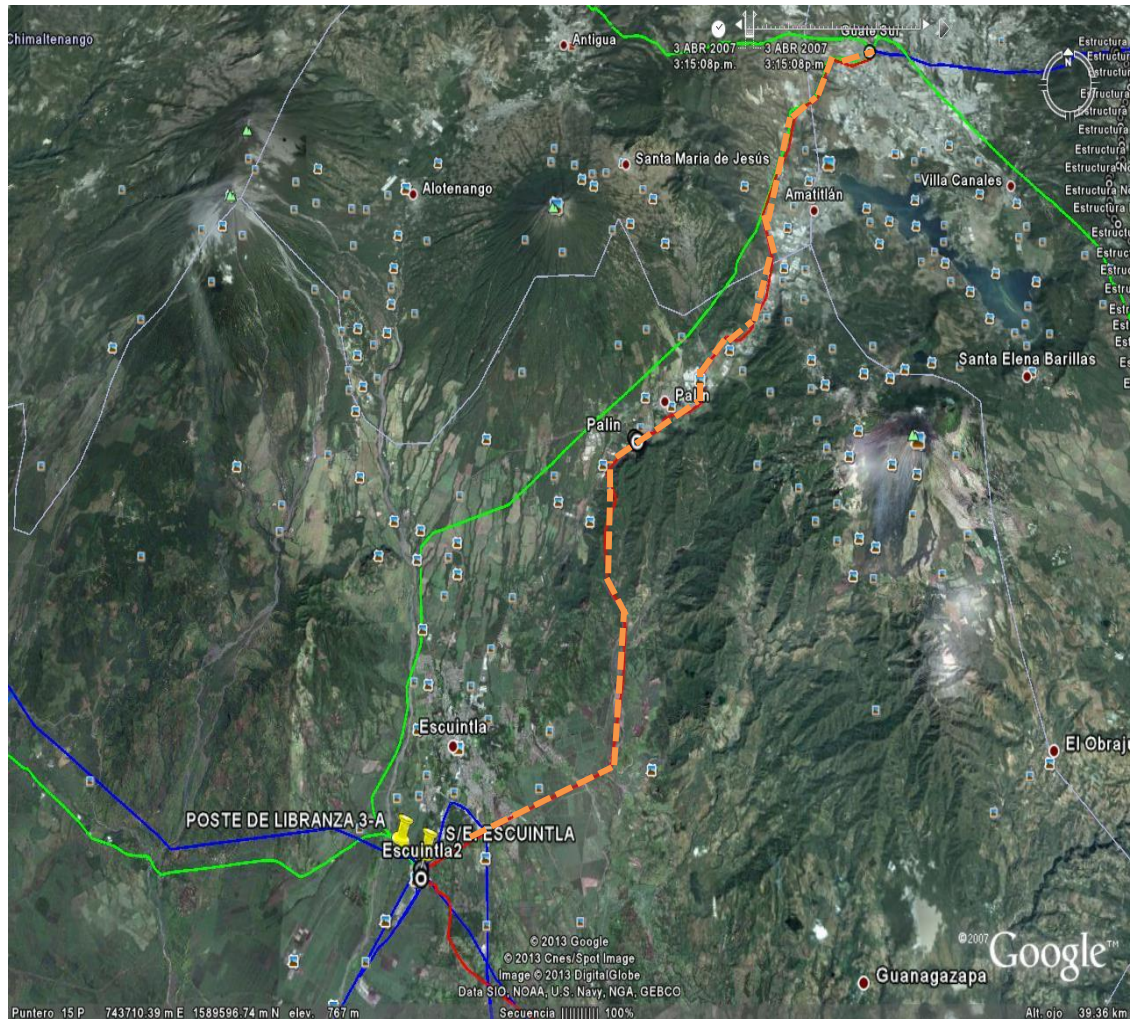
Figura 8. Se presentan los mismos valores que la figura 6, pero en fondo negro para resaltar más los resultados



Fuente: elaboración propia (2016)

La parte negativa indica que en el extremo de la Subestación de Escuintla la potencia fue mayor que en el extremo de Guate Sur. Como puede observarse la mayor parte de los días los valores son negativos, a lo cual, no se está aprovechando la capacidad de un transporte optimo en la línea de transmisión, aunque en términos del voltaje este sea eficiente. Figura propia de este estudio

Figura 9. Línea de Transmisión Escuintla – Guate Sur de 230 kv. sobre fotografía aérea.



Fuente: Google earth (2015). Línea: — — — — —

Para conocer la capacidad térmica de la línea se realizará un análisis de la capacidad o Límite Térmico de la línea de transmisión Escuintla – Guate Sur Circuito 1.

Con base al mapa de: “Regionalización del nivel térmico para conductor 477 ACSR “de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica ETCEE-INDE División de Planificación e Ingeniería Guatemala diciembre de 2005.

El valor de la corriente en su máxima capacidad de transporte se le llama límite térmico y para el cable tipo ACSR, 477 Hawk, se encontró basado en el trabajo realizado en ETCEE-INDE. El siguiente valor.

De la fórmula: $I^2 R + q_s = q_c + q_r$ donde despejando la corriente I, se tiene”:

$$I = \frac{\sqrt{q_c + q_r - q_s}}{R}$$

Donde R es la resistencia eléctrica del conductor a una temperatura máxima admisible de 75°, con un valor de 0.230 Ohm/milla.

Dónde: q_s es ganancia de calor solar

q_c es transferencia de calor por convección

q_r es radiación de calor.

De acuerdo a dicho documento, se tiene un valor de límite térmico igual a:

$I = 439$ Amp en la subestación de Escuintla que como es su valor más crítico se toma ese como representativo de la línea de Escuintla – Guate Sur de 230 kv , y como es de doble Az su valor se multiplica por 2 o sea su valor total será de:

$$I = 878 \text{ Amperios}$$

De acuerdo a la tabla VI de promedio de corrientes en la subestación de Guate Sur, se tienen en las 3 fases A, B y C. los valores de:

Fase A = 539.87 Amperios

Fase B = 586.85 “

Fase C = 554.28 “

En los cuales se puede observar que la fase B posee mayor carga, con una diferencia de 46.98 Amperios más que la fase A, representando un porcentaje de 8 % sobre la carga máxima, de lo cual se deberá tomar en cuenta para no llegar a tener desbalances de corriente demasiado elevadas.

Otro índice que se analizará es el desbalance de voltaje, el cual describe una situación en la cual, cualquier voltaje de un sistema trifásico no es idéntico en magnitud o la diferencia de fases entre si no están en 120° grados eléctricos o ambos casos a la vez. El grado de desbalance es generalmente definido por las componentes de secuencia negativa y cero.

El método simple para expresar el desbalance de voltaje es midiendo la desviación de voltaje Δu en cada una de las tres fases y compararla con el voltaje promedio de fase U_a :

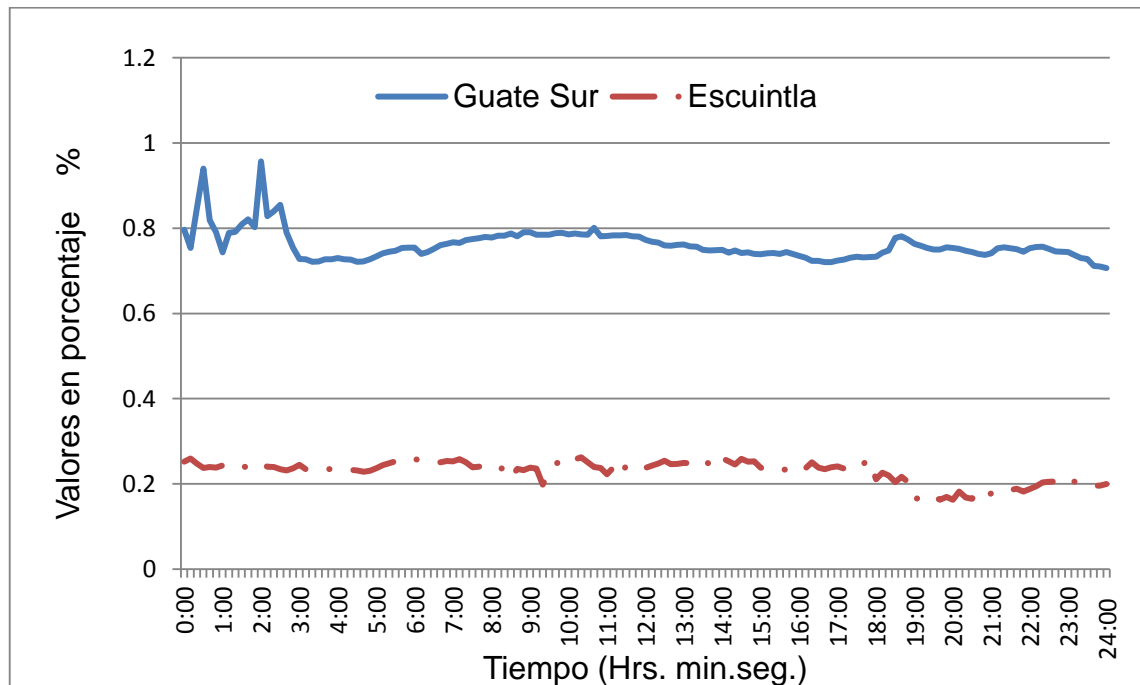
$$C_{vu} = \Delta u / U_a$$

C_{vu} es el coeficiente de desbalance de voltaje.

Tomado de: XVIII MEKO World Congress Metrology in the 3 rd. Millennium June 22-27, 2003. Dubrovnik, Croatia. Fundamentals of electrical power quality assessment. Janusz Mindykowski.

A continuación se tiene una gráfica de desbalance de voltaje de secuencia negativa y cero así como el desbalance de corriente obtenida de la línea de transmisión Escuintla – Guate Sur de 230 kilovoltios circuito1, el desbalance de corriente de secuencia negativa, llega a tener un pico de hasta 7%.

Figura 10. **Desbalance de voltaje máximo de secuencia negativa, en la cual se observa que es menor de 1.0 %.**

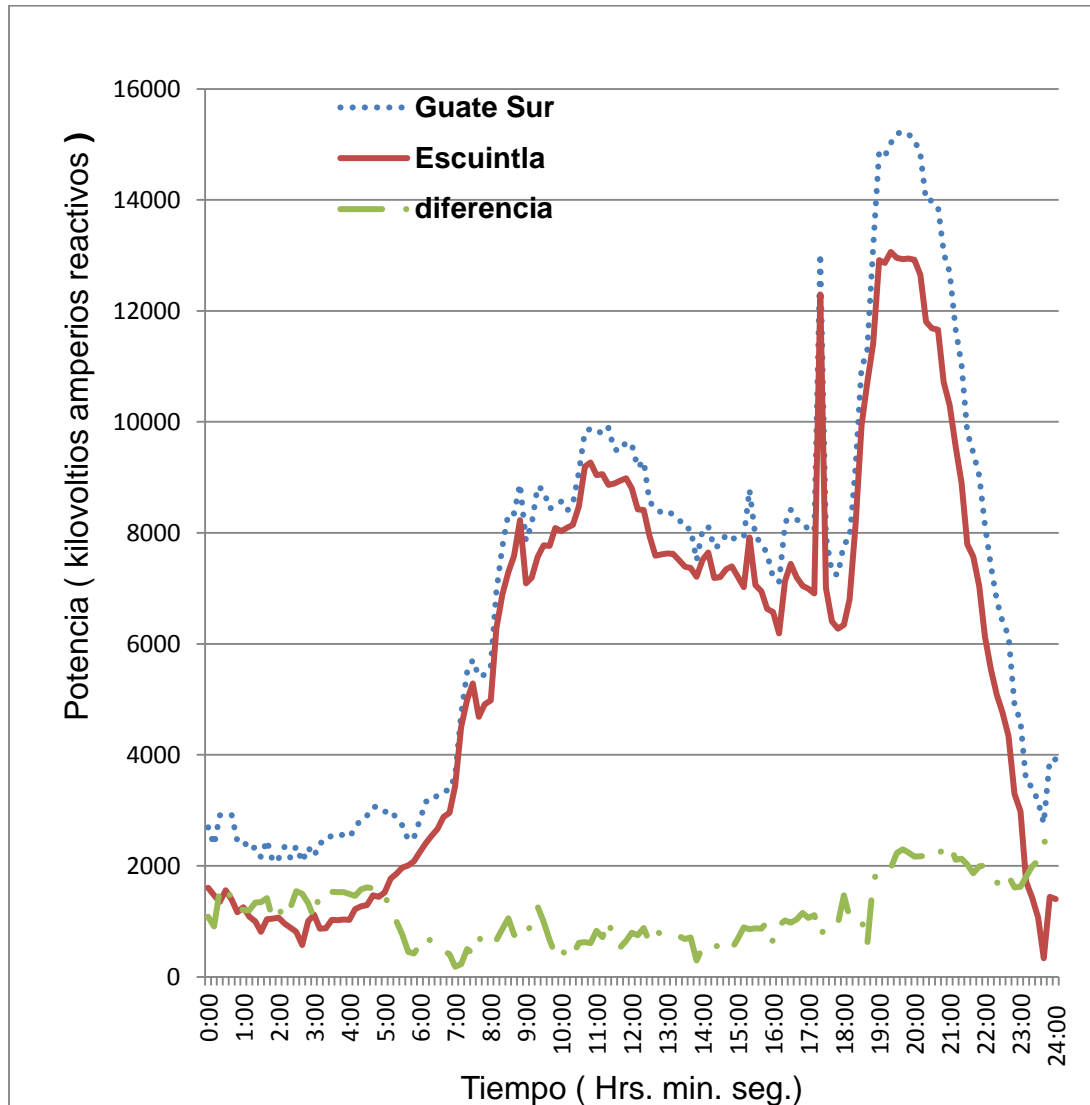


Fuente: elaboración propia (2016).

En la práctica, no es posible obtener una completa simetría en todos los nodos de un sistema de potencia, por lo que, se define como un desbalance de voltaje o corriente: a aquella condición en la cual los valores en las tres fases del sistema no son iguales en magnitud y/o en desplazamiento de ángulos entre las fases, diferente a 120° . Como una comparación para sistemas de bajo y medio voltaje el nivel de compatibilidad esta en 2%. John Wiley & So. Ltd. (2012, pag. 139, 140).

Por lo que, se puede considerar los fenómenos de desbalances en la línea, objeto de estudio de este trabajo, como dentro de un rango normal.

Figura 11. **Potencia reactiva fase C con diferencia, día 16 marzo 2013**



Fuente: elaboración propia.

Se Localizan cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día.

4.4. Discusión de resultados

1. A través de la observación de las gráficas de voltajes de cada fase, durante los 7 días de la información recabada, se tiene la conclusión que la configuración de las 3 fases en las estructuras que las sostienen, tiene un efecto importante, siendo que: la fase C, que está más próxima a la tierra, produce un efecto capacitivo que incrementa el voltaje sobre las otras dos fases: A y B, por lo que, se observa que los voltaje en fases A y B en Escuintla, son mayores que en la Subestación de Guate Sur; en la fase C el incremento entre los extremos es de 3 kilovoltios, siendo mayor en Guate Sur .
2. La diferencia de voltajes indicada anteriormente hace que exista un desbalance de voltajes entre fases, ya que el voltaje entre fases A-B, produce valores más altos en el extremo de Escuintla que en Guate Sur y los valores entre fase entre B-C y C-A, donde se involucra la fase C, hace incrementar el voltaje en el lado de Guate Sur. . Según la UNE-EN 50160, en condiciones normales de operación, los valores eficaces de la tensión de alimentación medida en períodos de 10 min, deben situarse en los intervalos siguientes: $Un \pm 10\%$ durante el 95% de una semana $Un + 10\% / -15\%$. Durante el 100% de una semana. A lo cual el voltaje de 230 kv. No llega a 253 Kv. Ni baja a 207 kilovoltios, Por lo que, se encuentra estable; de las variaciones sobre la tensión nominal, suelen ser pequeñas y mayoritariamente se encuentran dentro del $\pm 20\%$.
3. Respecto a las corrientes de las fases A, B y C, llegan a un valor máximo de 450 Amperios, con una diferencia máxima de 4 amperios entre Escuintla y Guate sur, observando que en la fase C el valor de la corriente es mayor en Guate Sur que en Escuintla. O sea que si la corriente máxima admisible es

de 878 amp. Los 450 son el 51 % de capacidad de transporte, que se está empleando la línea de transmisión en relación a su amperaje.

4. Respecto a las potencias máximas de cada fase, estas llegan a un máximo de 63 MW. Y la diferencia entre Escuintla y Guate Sur tienen un valor pico de 300 kilowatts, produciéndose alteración en el intercambio a cada 20 minutos aproximadamente. También se observa que los valores de la potencia máxima en la fase B, los valores mayores los tiene la Subestación de Escuintla llegando hasta 700 kilowatts, con respecto al Extremo de la subestación de Guate Sur; en la fase C, la potencia máxima la tiene la Subestación de Guate Sur con una diferencia hasta 900 kilowatts, en conclusión se tienen una transferencia de potencia de un extremo a otro muy desigual en cuando a cada fase se refiere. También la potencia en las 3 fases será:

$$P_{\text{total}} = 3(I_{\text{fase}} \times V_{\text{fase}} \times \cos \phi) = 3 \times (\text{Pot. fase})$$

$$\text{Si } \cos \phi = 1.$$

$$\text{Se tiene: Potencia trifásica total} = 3 \times (63) = 189 \text{ MW.}$$

5. En la potencia total máxima de la línea, se tiene un valor pico de 250 MW, con una diferencia pico entre extremos de la línea de 1 MW. y con variaciones entre 200 y 400 kilowatts, estas son más continuas aproximadamente cada 20 minutos, durante las 24 horas.
6. Para la potencia aparente, entre los extremos de la línea resulta ser muy semejante la curva en las 3 fases de la línea durante las 24 horas y se tiene un valor de pico máximo por fase de: 80 Megavoltios-amperios, también se observa en la fase C, el cambio en que el extremo de Guate Sur es mayor en 800 kilovoltios amperios, que en el lado de Escuintla.

7. Respecto a la potencia reactiva, se observa que la forma de la curva en sus 24 horas es semejante a la curva de la demanda diaria, también aproximadamente a las 17:00 se produce un pico de potencia reactiva, debida a una posible conexión de alguna planta o carga importante, ya que se viene produciendo una caída de voltaje de aproximadamente 2,000 voltios. A las 10:00 y a las 11:00 aproximadamente, también se producen picos de aumento de reactiva, que atraviesan la línea de transmisión. El factor de potencia mínimo es de: 0.9955 o sea 0.0045 de diferencia con la unidad.
8. Se tienen una frecuencia mínima de 59.90 Hz. por lo que, tanto el factor de potencia como la frecuencia mínima se encuentra dentro de los valores aceptables que indican las normas eléctricas actuales: La exactitud en la medida para equipos de clase A debe ser $\pm 0,01$ Hz. Medida según la IEC 61000-4-30 (Clase A: Corresponde a los equipos de mayor exactitud, necesarios, por ejemplo para aplicaciones contractuales, verificación del cumplimiento de las normas, resolución de disputas, etc.).
9. De los resultados del desbalance de corriente negativa se observa en las gráficas que esta oscila entre 4 y 5 % teniendo un valor pico de hasta de 7%, por lo que, aún se encuentra en un rango aceptable, ya que el "Artículo 32. Tolerancias para el Desbalance de Corriente. Se establece una tolerancia de diez por ciento (10%), para el Desbalance de Corriente". Según: Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. GUATEMALA, C. A.
10. Teóricamente para una corriente máxima de 878 amperios valor de ampacidad térmica supuesta de la línea de transmisión y a un voltaje de 230 kv. Se tiene una potencia máxima de:

$$\text{Potencia} = V \cdot I \cos \phi$$

Para $\cos \phi = 1$ se tendrá:

$$\text{Pot.} = 230 \times 878 \times 1$$

$$\text{Pot} = 201.9 \text{ MW.}$$

De la potencia trifásica obtenida que es de 189 Megawatts se tiene un porcentaje de: 93.56% que se está empleando de la capacidad de la línea, tomando el valor teórico obtenido de: 202 MegaWatts, como el 100 %.

11. Los 175 kw. Por 24 hrs. Son 4.2 Megawattshoras de energía pérdida en la línea de transmisión que económicamente equivale a:

Si el valor del kilovatio-hora es de 1.424992 Q/kWhr. Tarifa vigente febrero – abril 2015, para 4,200 KWhr, se tiene un valor de la pérdida de: Q 5,985 por día, por un mes de 30 días serían: Q179, 549 por mes. Por un año sería: Q2, 154,587.8 al año.

12. En la sección No. 5.3 se tiene una eficiencia de 99.90%, por lo que, a pesar del desbalance de voltaje y los picos de tensión y corriente que existen por entrada de generadores en el extremo de Escuintla así como de posibles cargas fuertes en la demanda o fallas de alta impedancia, la línea aún es eficiente.

13. La línea está al 51% de su capacidad térmica de transporte de corriente eléctrica de una subestación a otra y se tiene un 93.56% de su capacidad en potencia trifásica que se está empleando de la línea, o sea que aunque la línea se reporta eficiente, ya se está llegando a su capacidad máxima de transporte de energía, trayendo consigo desbalance de voltajes y picos o elevaciones de corriente y voltajes, debido a las interconexiones de plantas o cargas de usuarios, principalmente en Escuintla que sea transfieren a la Subestación de Guate sur, a través de la línea.

14. Sobre perturbaciones algunas veces las causas de perturbación son externas, siendo las más comunes las perturbaciones atmosféricas y las elevaciones del potencial de tierra en condiciones de defecto.
15. Respecto a las fluctuaciones de tensión: para este trabajo de rangos de 10 minutos, únicamente se encuentra que su amplitud no supera el $\pm 10\%$ de tensión nominal; estas fluctuaciones existen cuando se producen variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de alimentación.

4.5 Gráficas de los resultados

Se presenta el ejemplo del día 16 de marzo de 2013, las gráficas de los promedios de todos los parámetros eléctricos mencionados anteriormente, tomándose los valores del voltaje, la corriente y la potencia activa, para analizarlos cada día, describir los resultados y finalmente obtener la calidad de transporte de la energía del circuito I de la línea en mención.

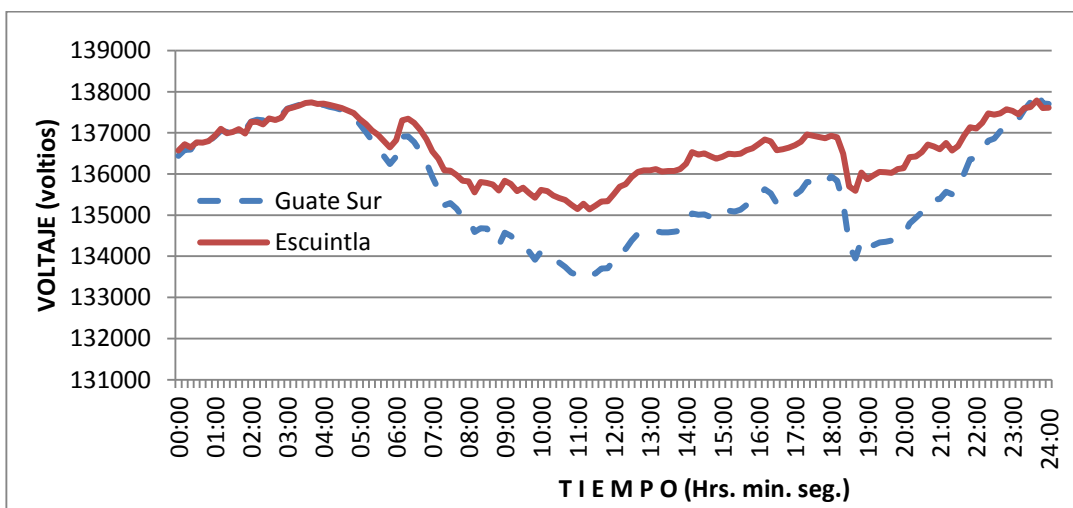
4.5.1 Comparación de gráficas de las subestaciones

Se procedió a graficar de una forma superpuesta los valores obtenidos de cada subestación, para tener una visión más clara del comportamiento eléctrico y conocer los distintos cambios en que pudieran incurrir, luego se graficó en forma separada la diferencia obtenida al comparar los valores de las dos subestaciones, para las diferencias, cuando las curvas se encuentran en el cuadrante negativo (-) indican que los valores son mayores en el extremo de Escuintla, que en el extremo contrario o sea Guate Sur, ya que la diferencia se calculó desde la subestación de Guate Sur. o sea: Guate Sur - Escuintla

Las gráficas que resultaron de los valores obtenidos se presentan en la sección siguiente de este trabajo, lo que respecta al día 16 de marzo de 2013, como un ejemplo de este estudio de investigación.

Figuras de parámetros

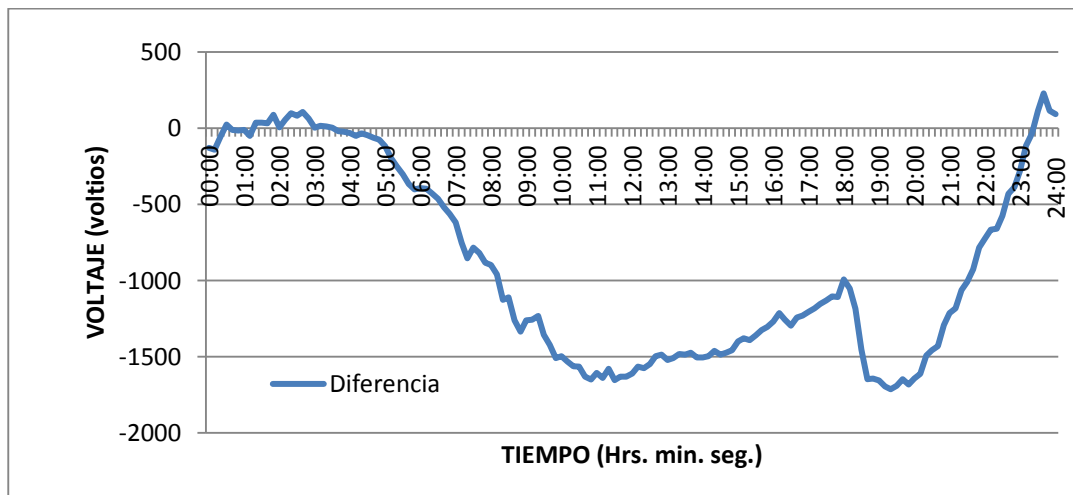
Figura 12. De los parámetros obtenidos el día 16 de marzo de 2013
Voltaje promedio RMS fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

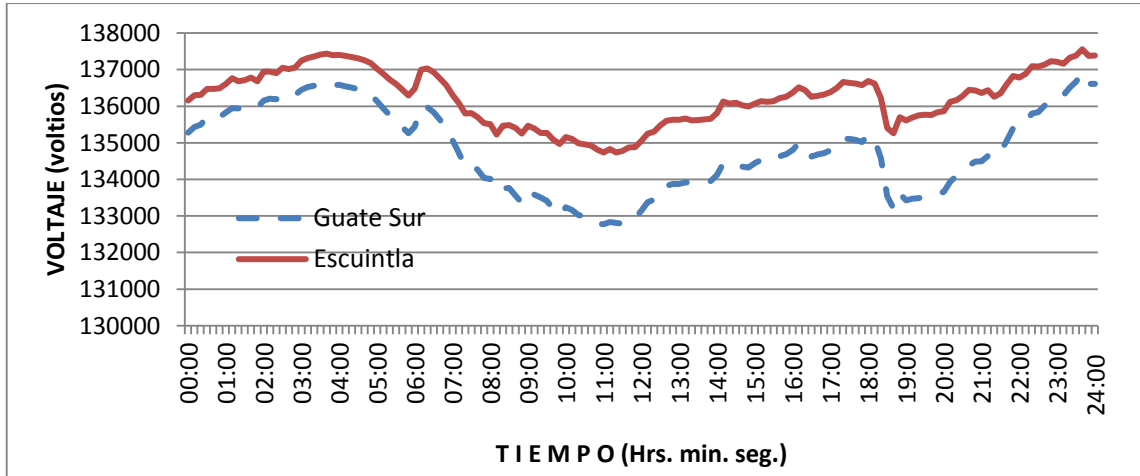
Figura 13. Diferencia de voltaje promedio RMS fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de voltaje y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

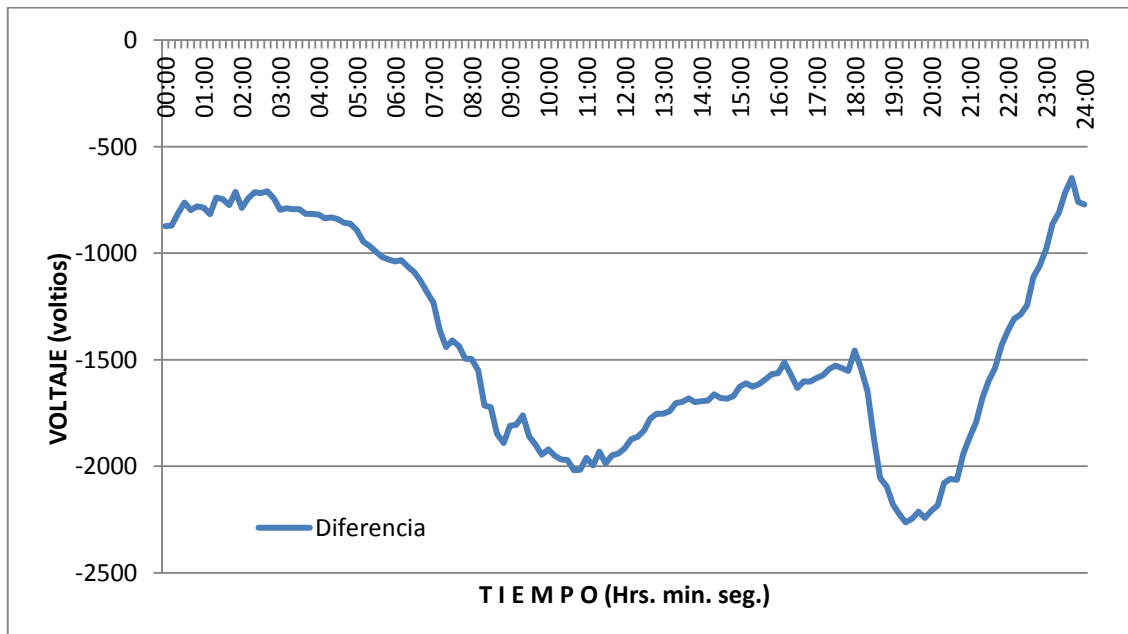
Figura 14. Voltaje promedio RMS fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

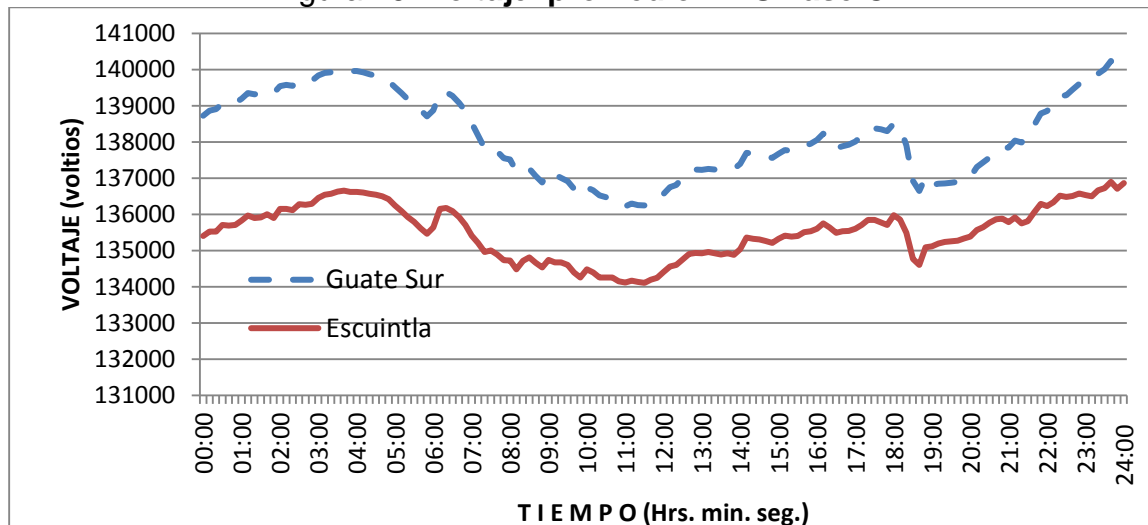
Figura 15. Diferencia de voltaje promedio RMS fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de voltaje y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

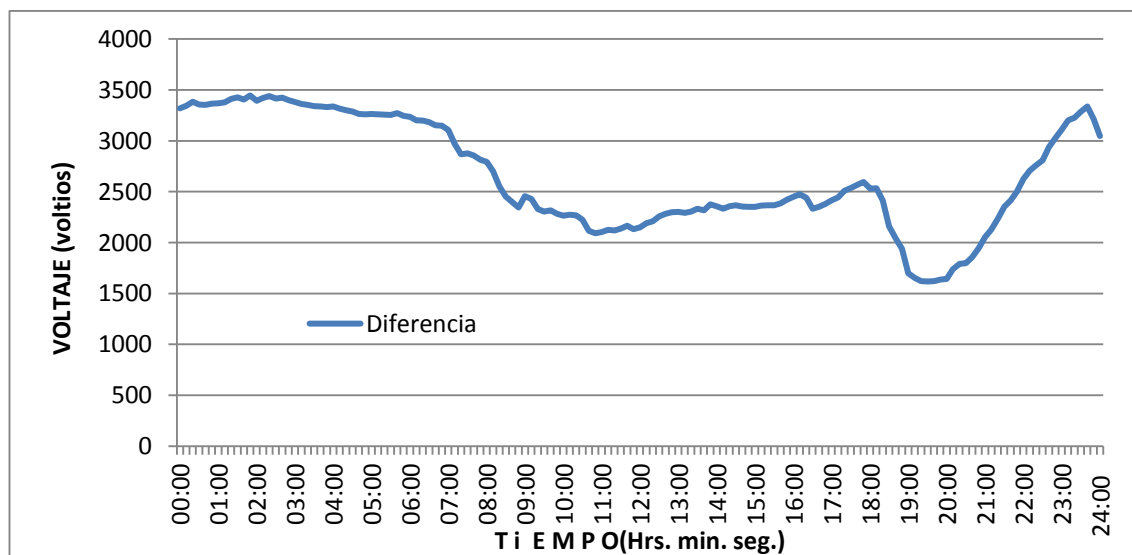
Figura 16. Voltaje promedio RMS fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

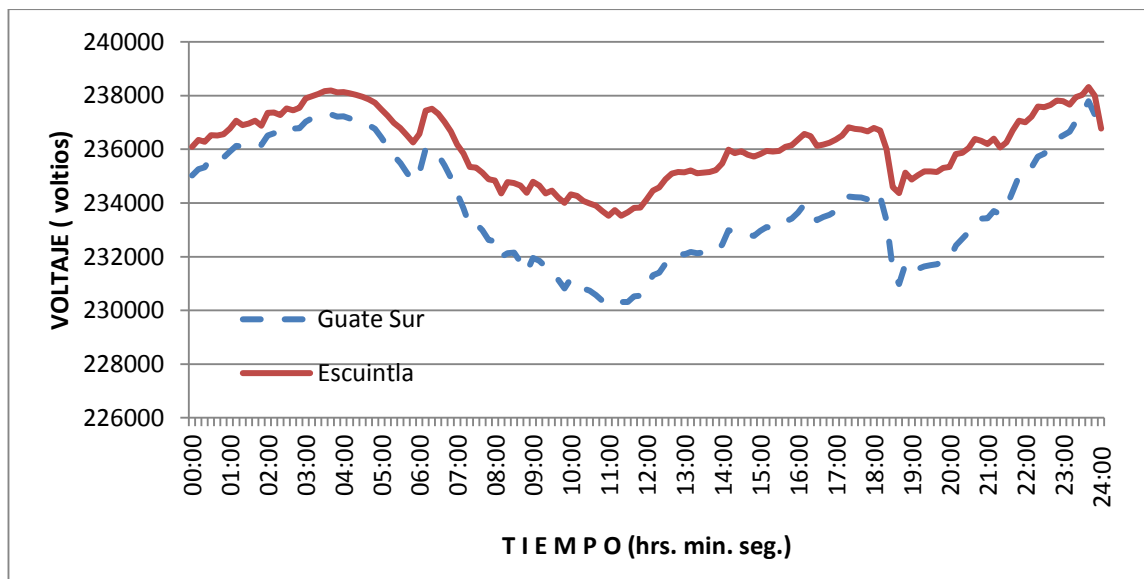
Figura 17. Diferencia de voltaje promedio RMS fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de voltaje y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

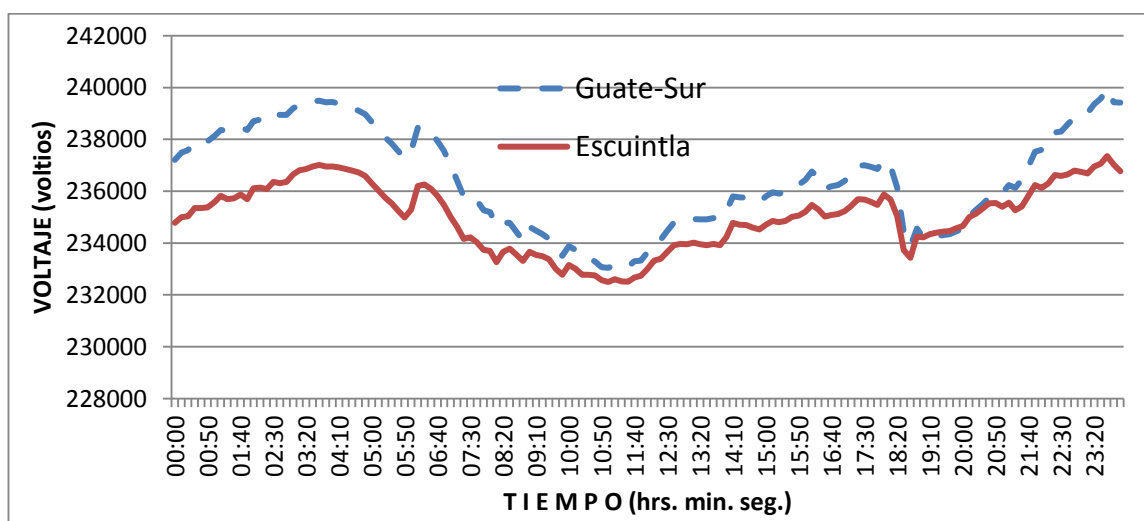
Figura 18. Voltaje entre fases A-B promedio



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

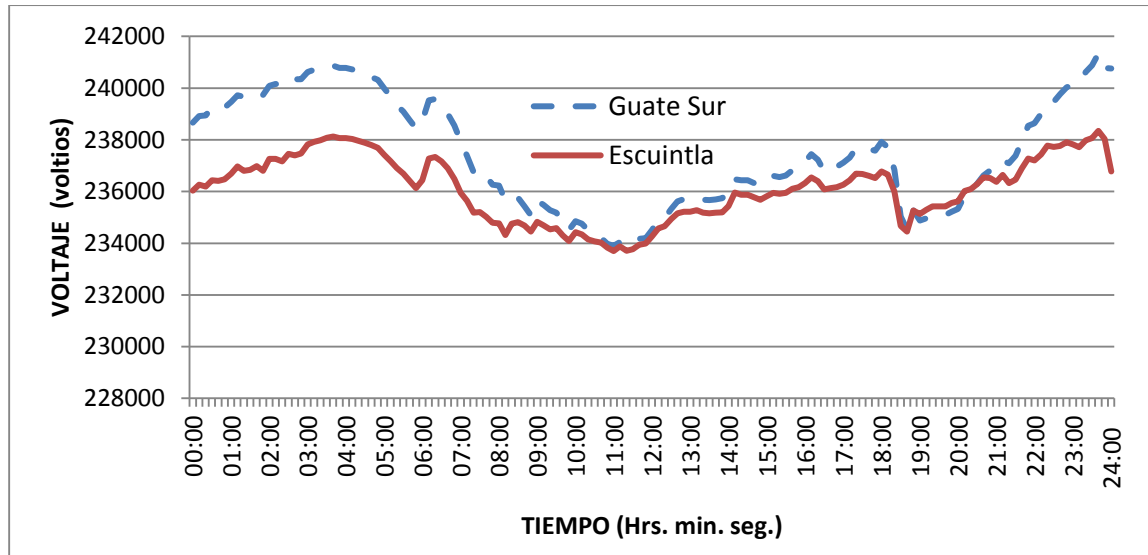
Figura 19. Voltaje entre fases B-C promedio



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

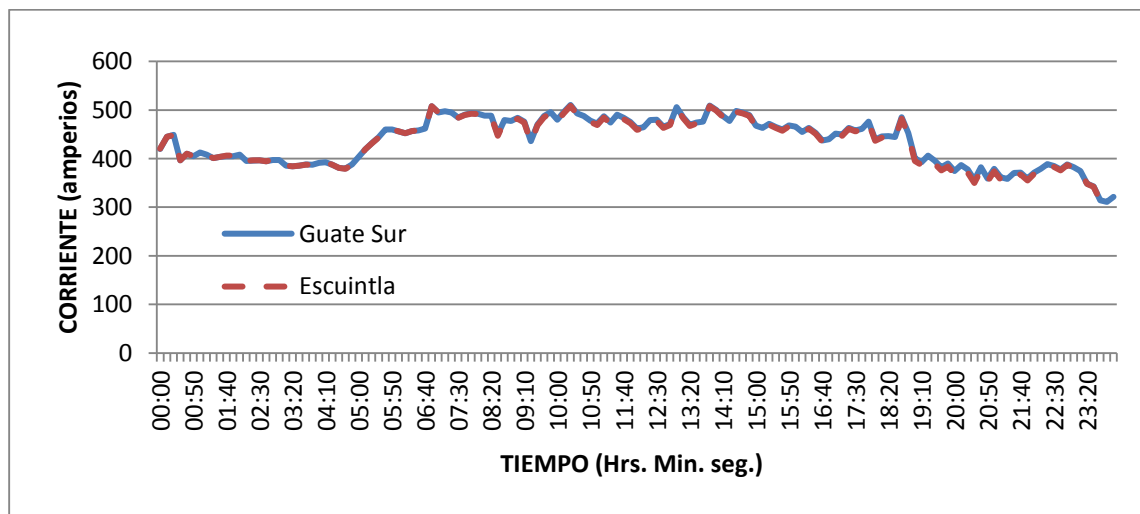
Figura 20. **Voltaje entre fases C-A promedio**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de voltaje, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

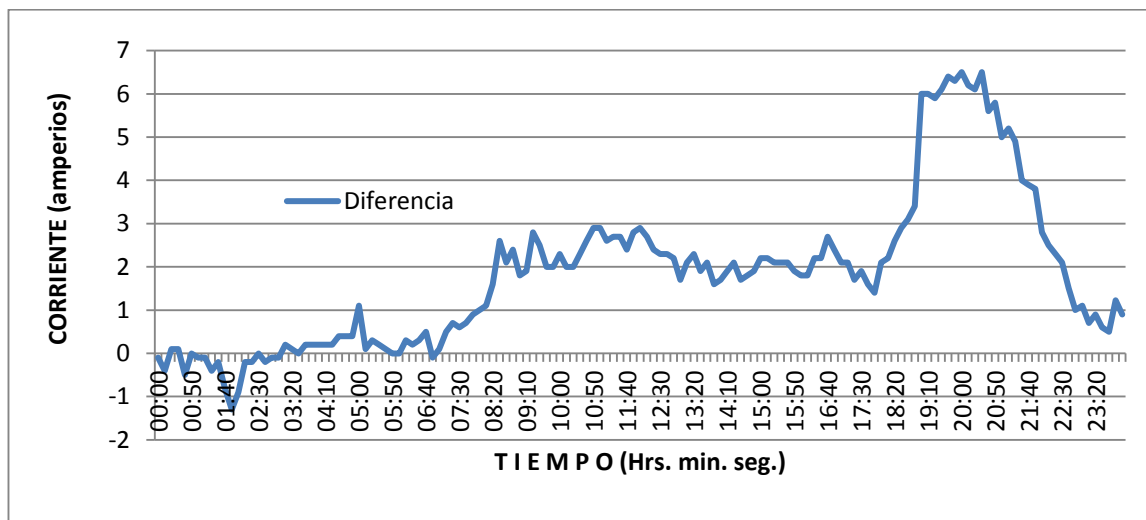
Figura 21. **Corriente máxima RMS fase A**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de corriente, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la corriente eléctrica de la línea.

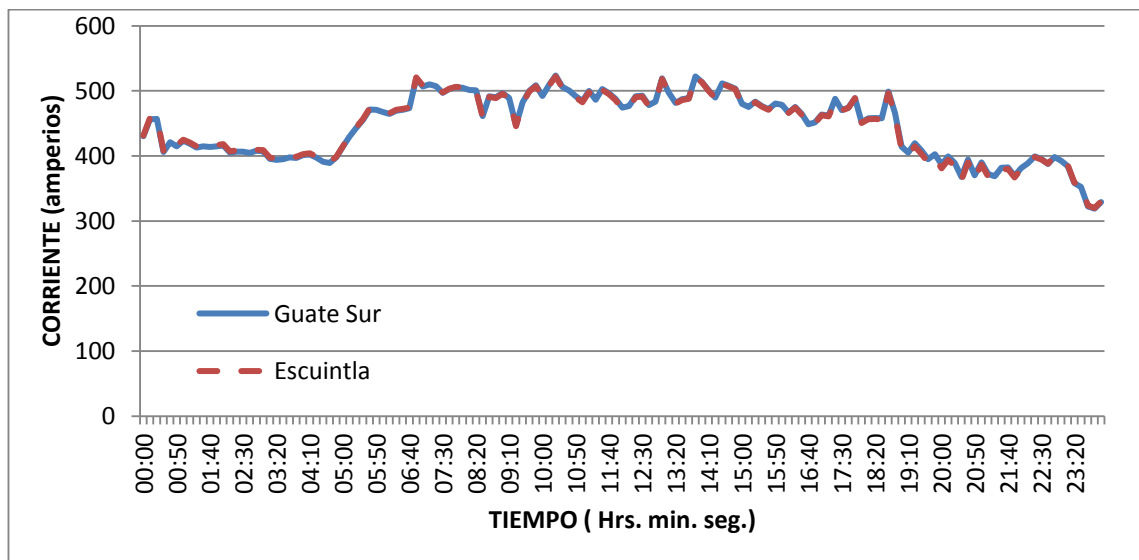
Figura 22. **Diferencia de corriente máxima RMS fase A**



Fuente elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de corriente y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

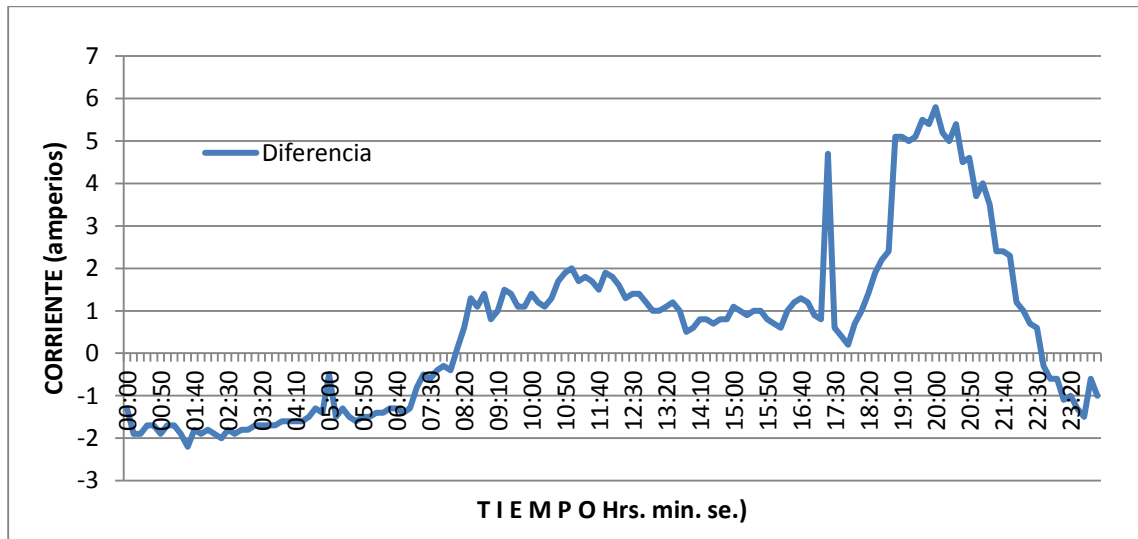
Figura 23. **Corriente máxima RMS fase B**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de corriente, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la corriente eléctrica de la línea.

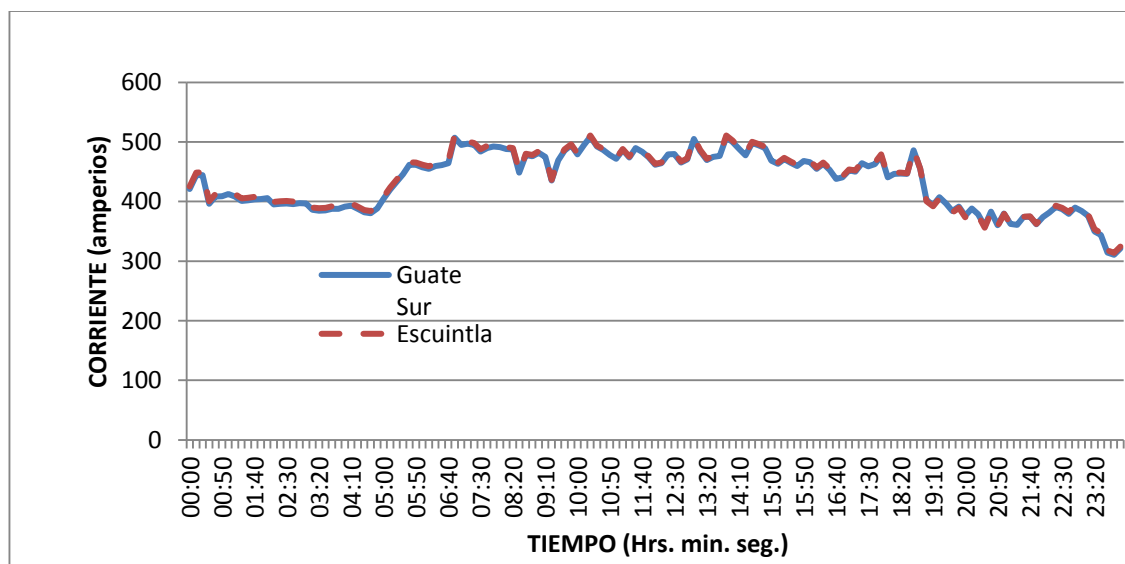
Figura 24. Diferencia de corriente máxima RMS fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de corriente y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

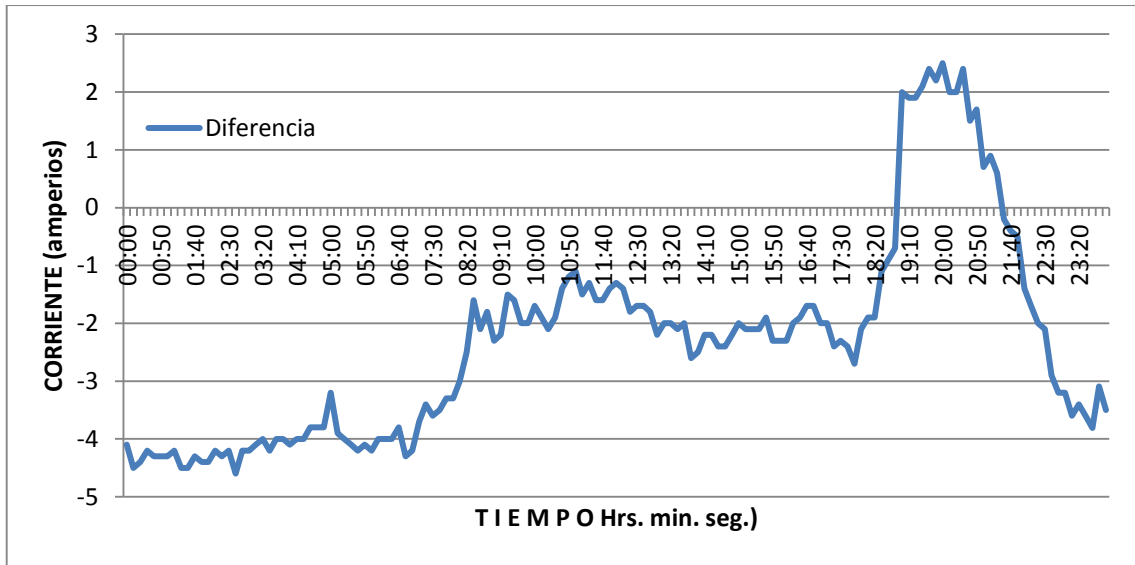
Figura 25. Corriente máxima RMS fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de corriente, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la corriente eléctrica de la línea.

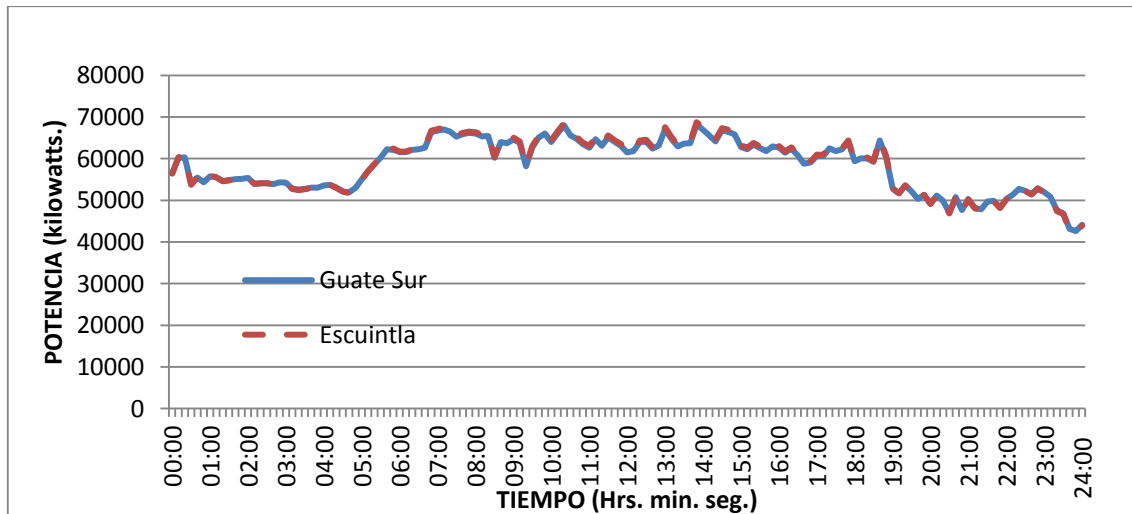
Figura 26. **Diferencia de corriente máxima RMS fase C**



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de corriente y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

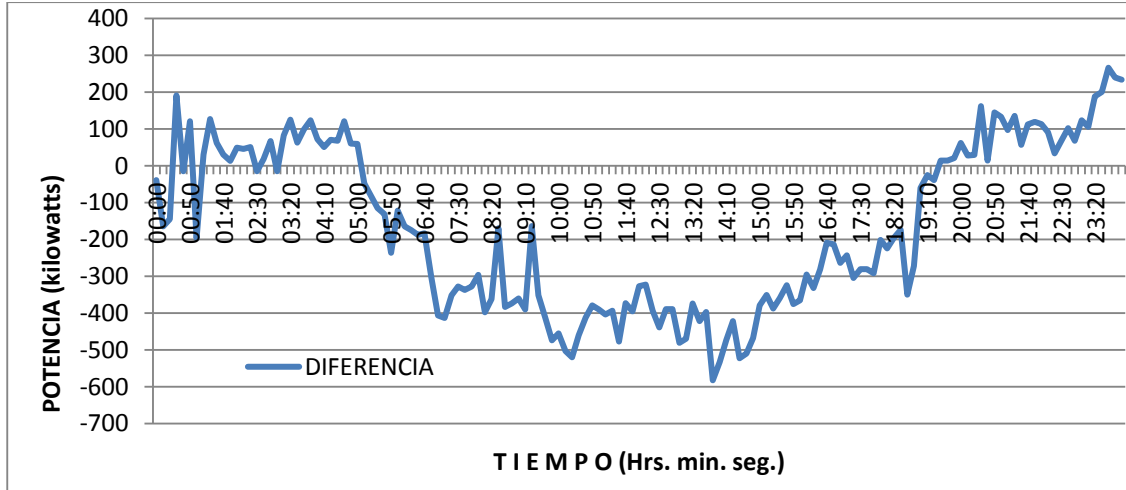
Figura 27. **Potencia máxima activa fase A**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

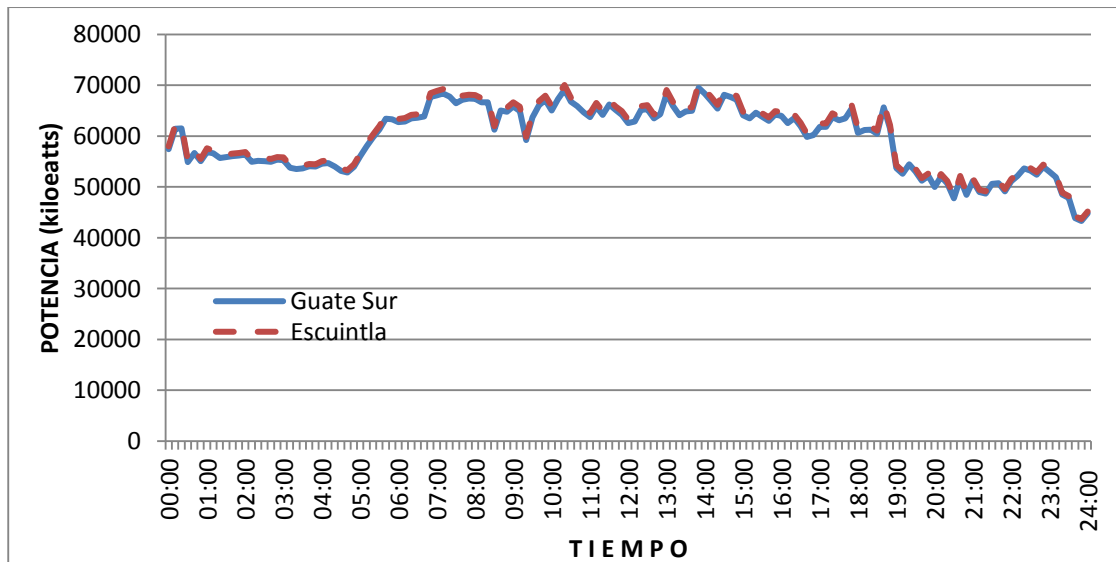
Figura 28. Diferencia de potencia máxima activa fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

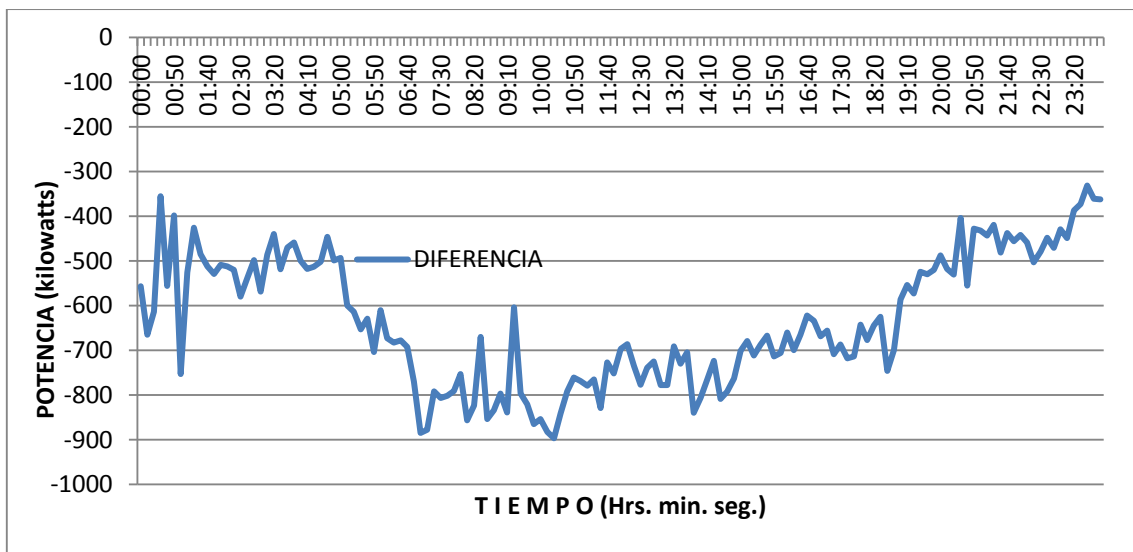
Figura 29. Potencia máxima activa fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

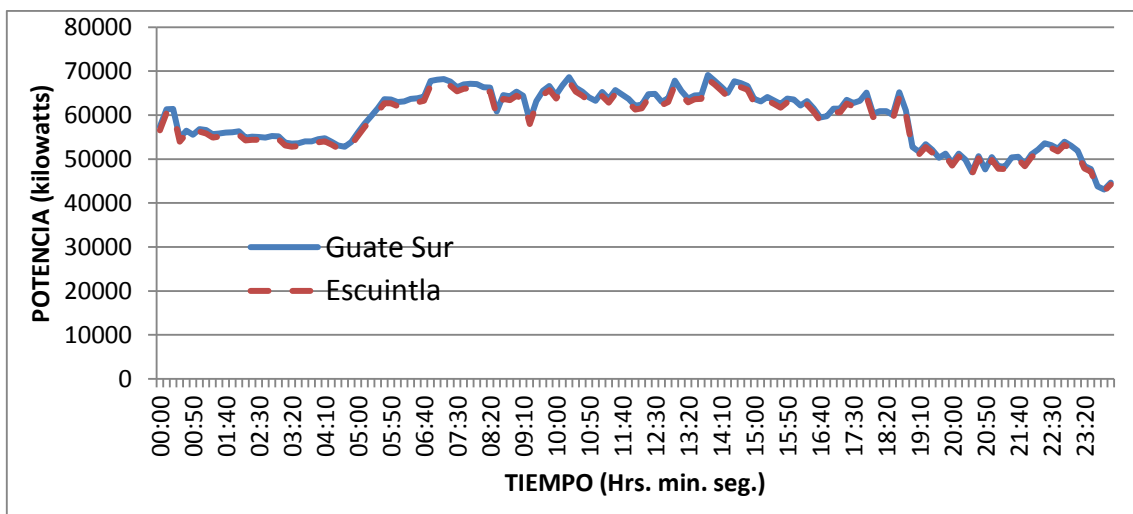
Figura 30. **Diferencia de potencia máxima activa fase B**



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia de e y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

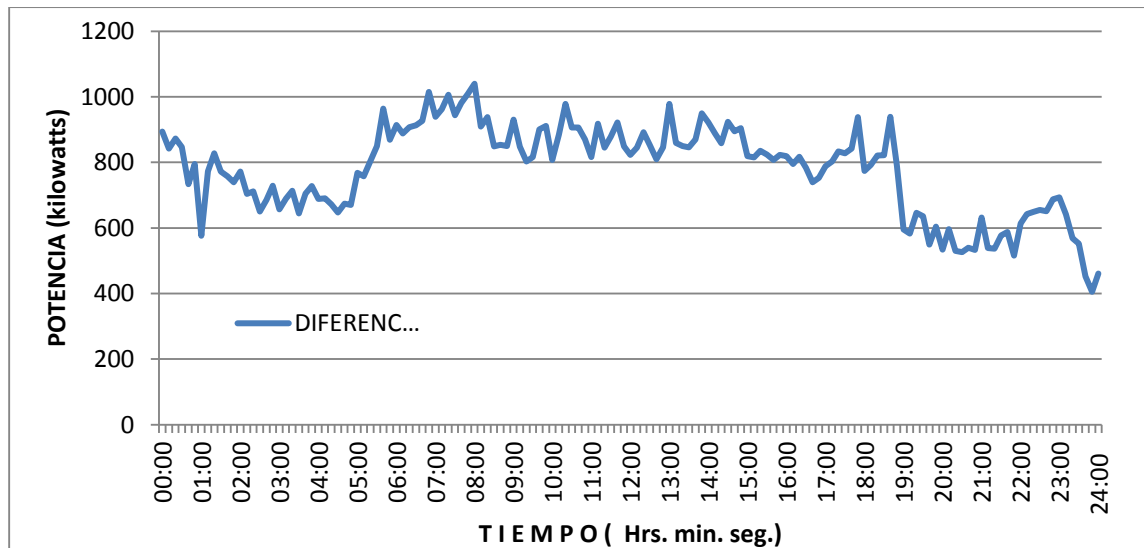
Figura 31. **Potencia máxima activa fase C**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

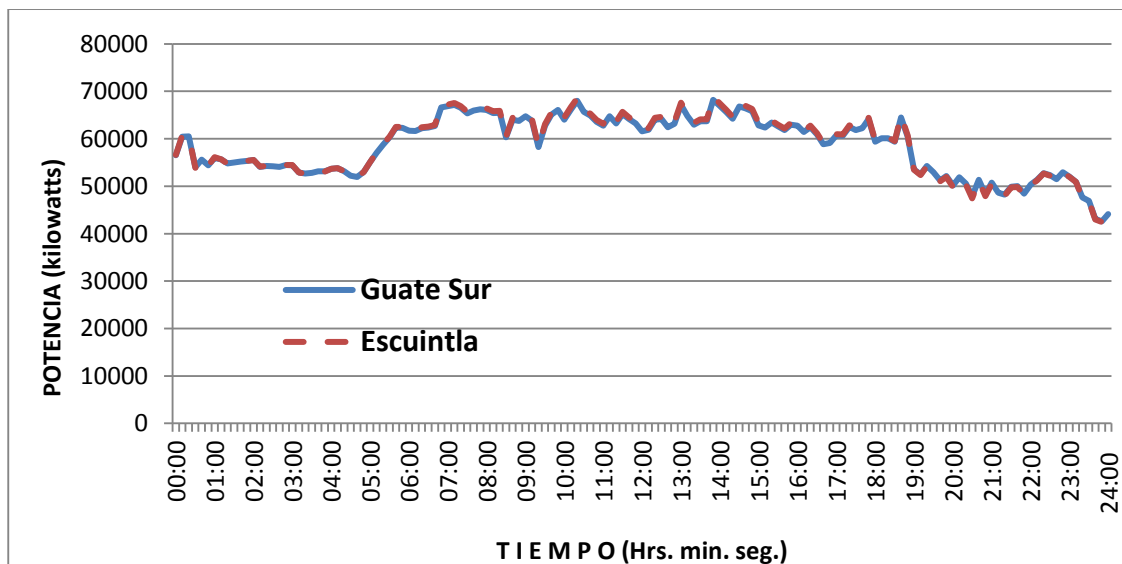
Figura 32. Diferencia de potencia máxima activa fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

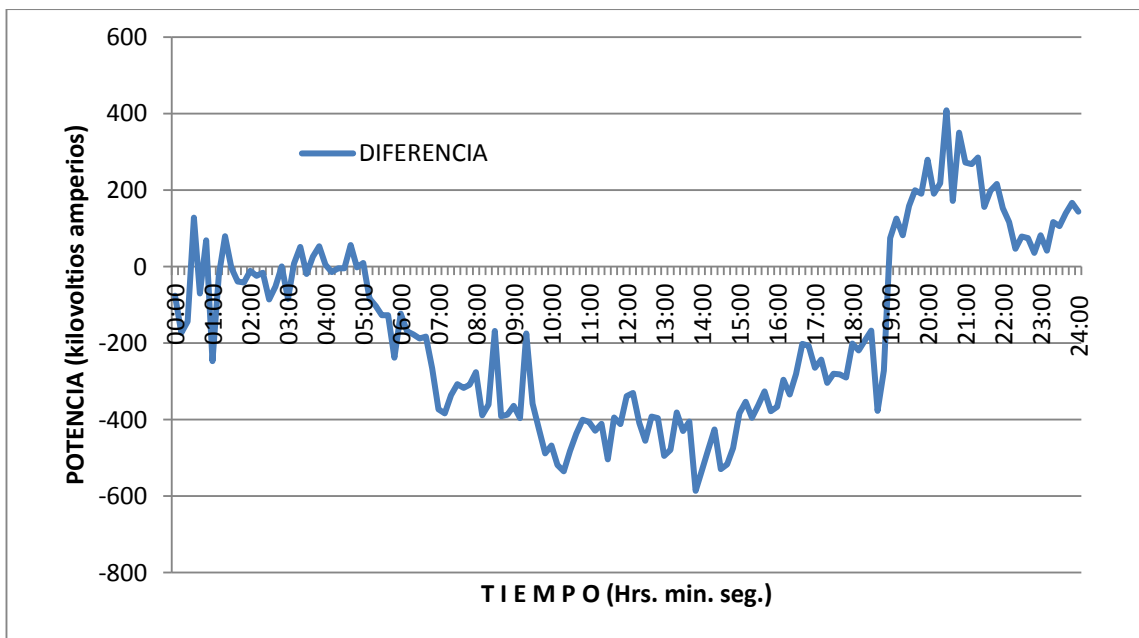
Figura 33. Potencia aparente fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

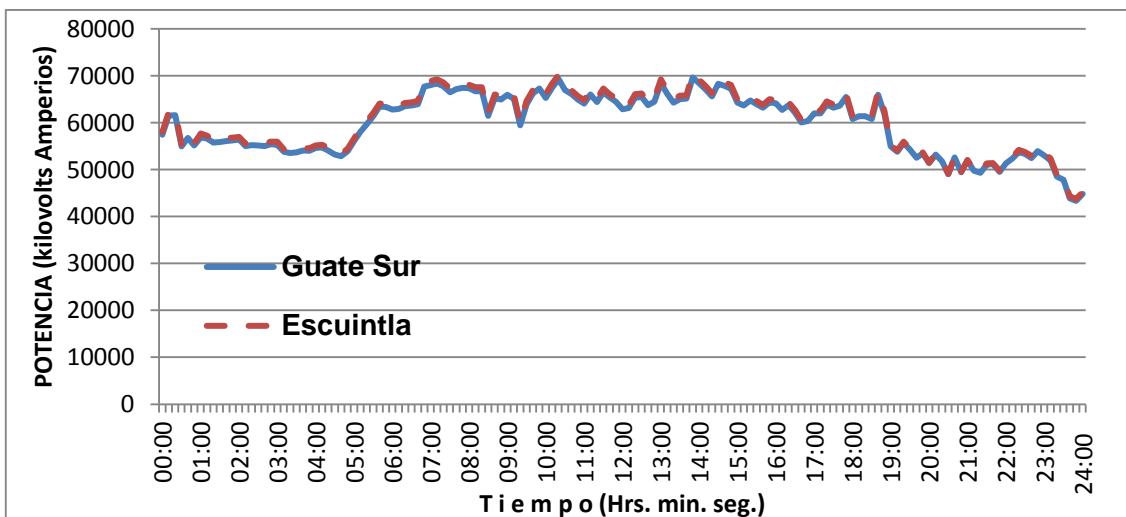
Figura 34. **Diferencia de potencia aparente fase A**



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

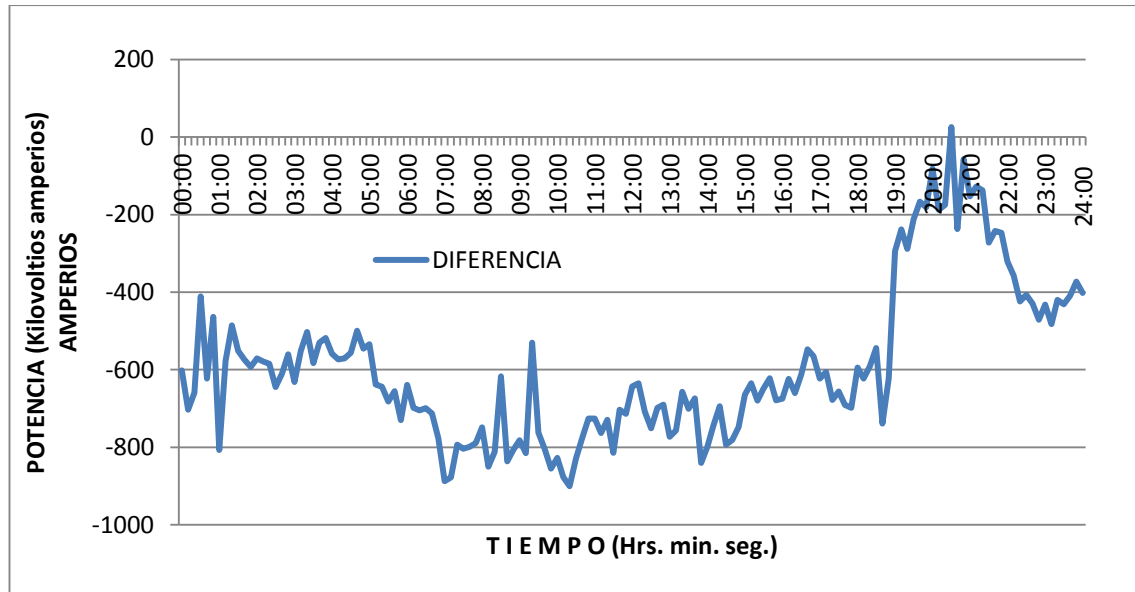
Figura 35. **Potencia aparente fase B**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

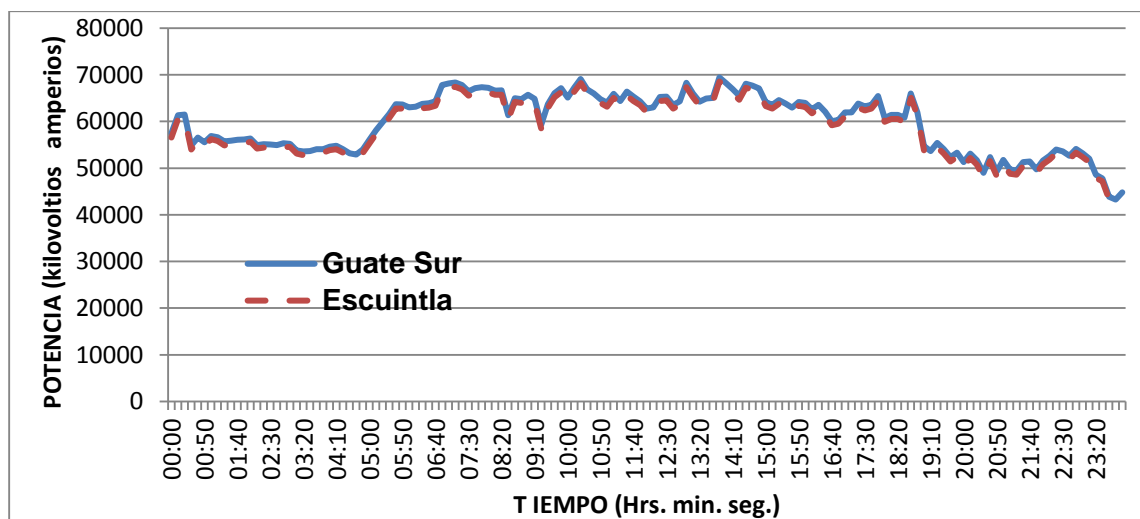
Figura 36. Diferencia de potencia aparente fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

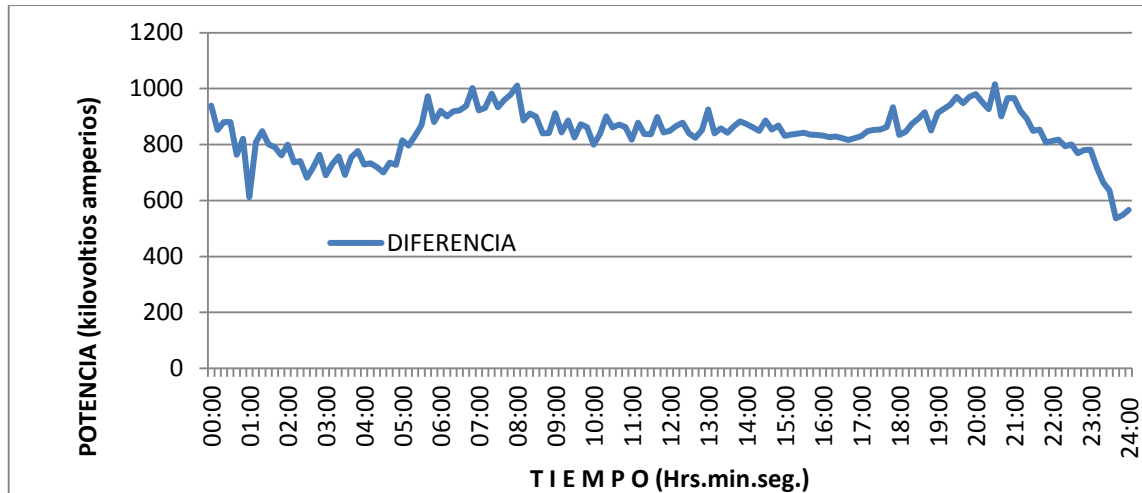
Figura 37 .Potencia aparente máxima fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

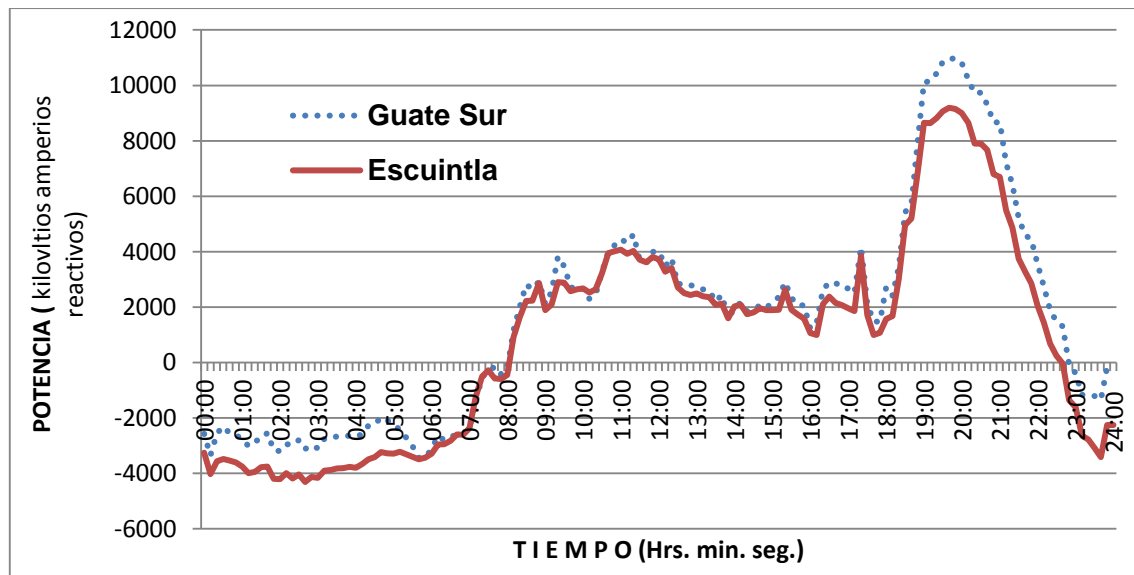
Figura 38. Diferencia de potencia aparente máxima fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

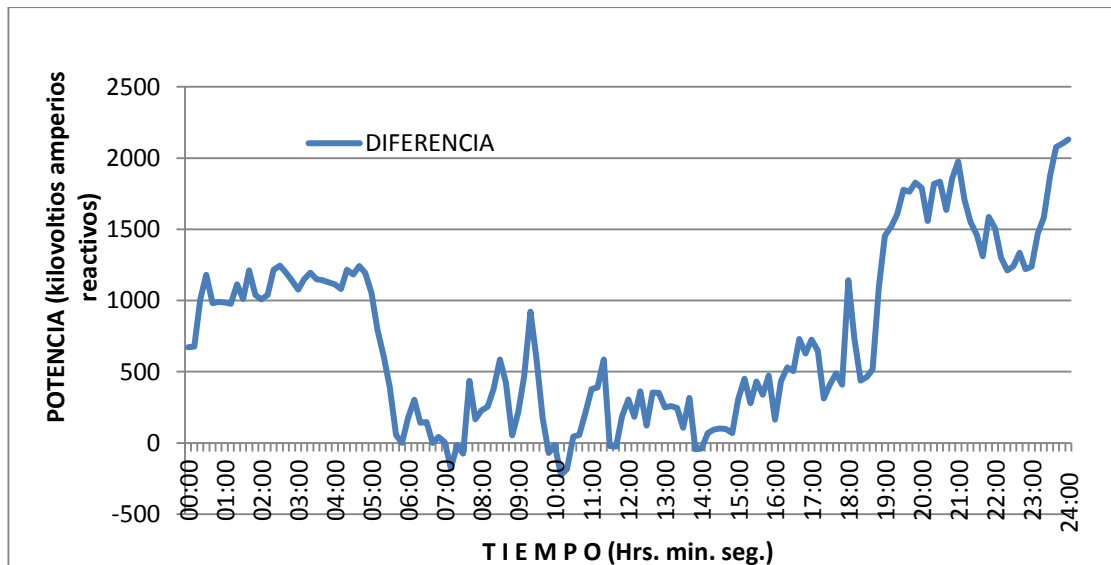
Figura 39. Potencia reactiva máxima fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

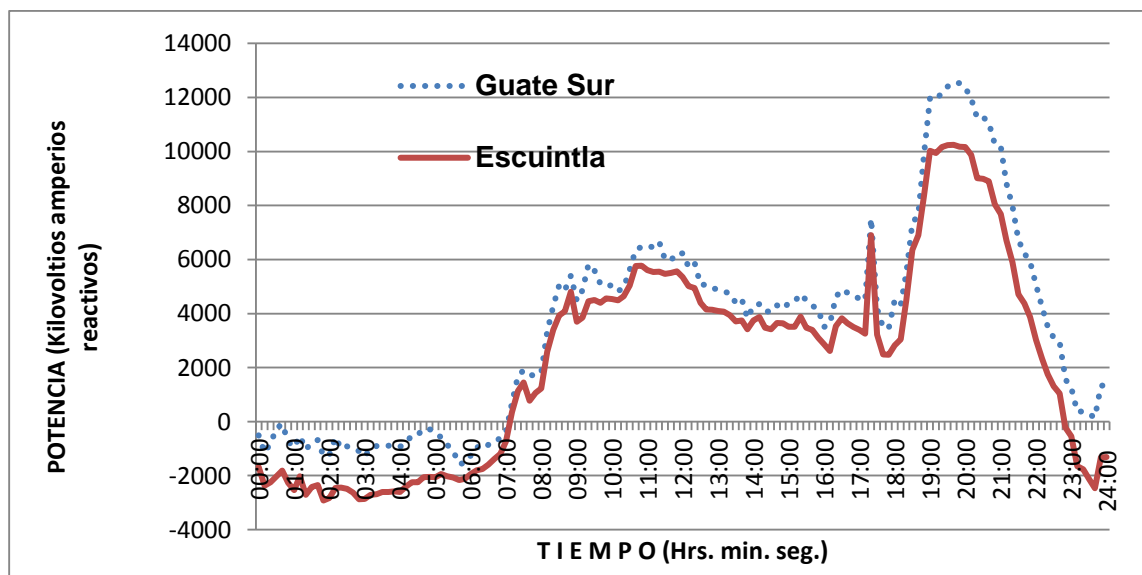
Figura 40. **Diferencia de potencia reactiva fase A**



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

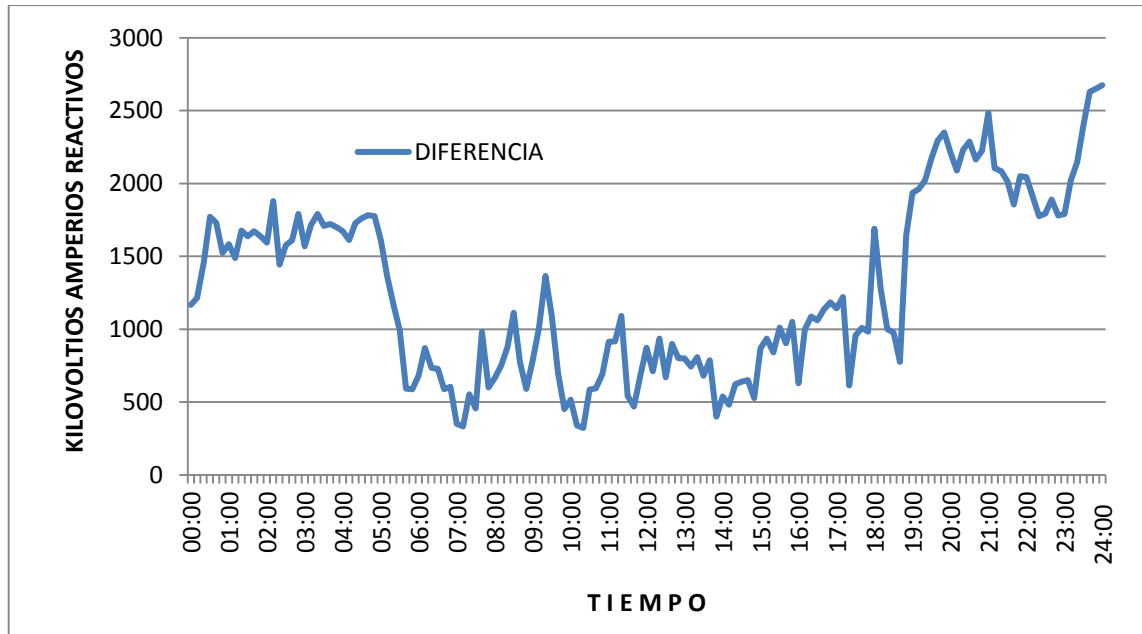
Figura 41. **Potencia reactiva fase B**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

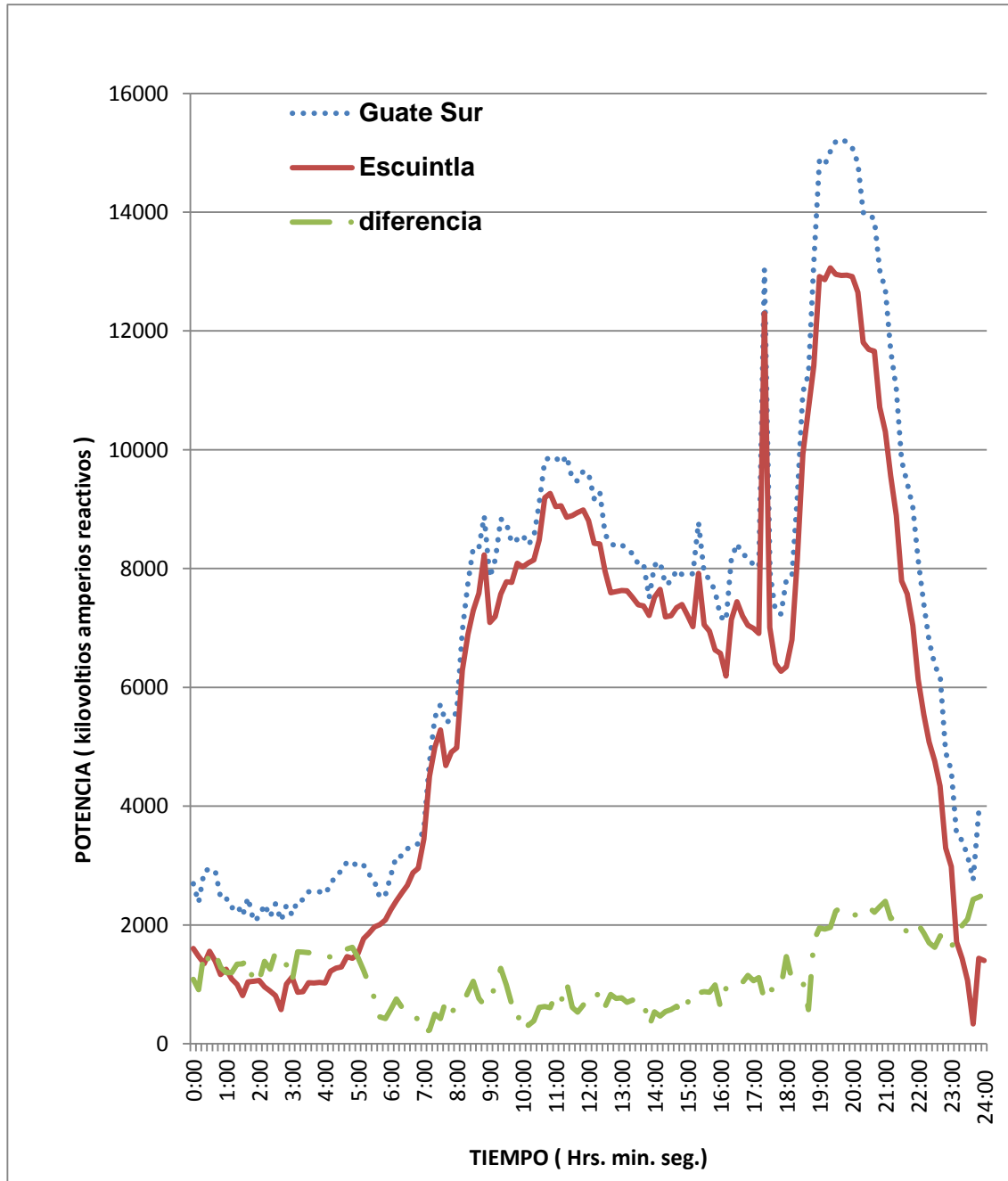
Figura 42. Diferencia de potencia reactiva fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de potencia y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

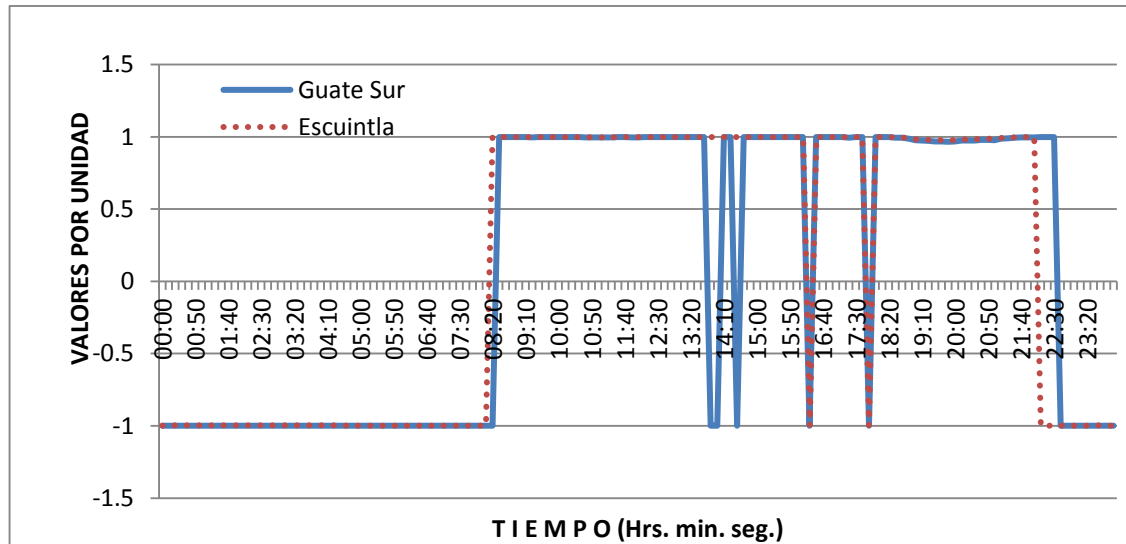
Figura 43. **Potencia reactiva fase C con diferencia**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

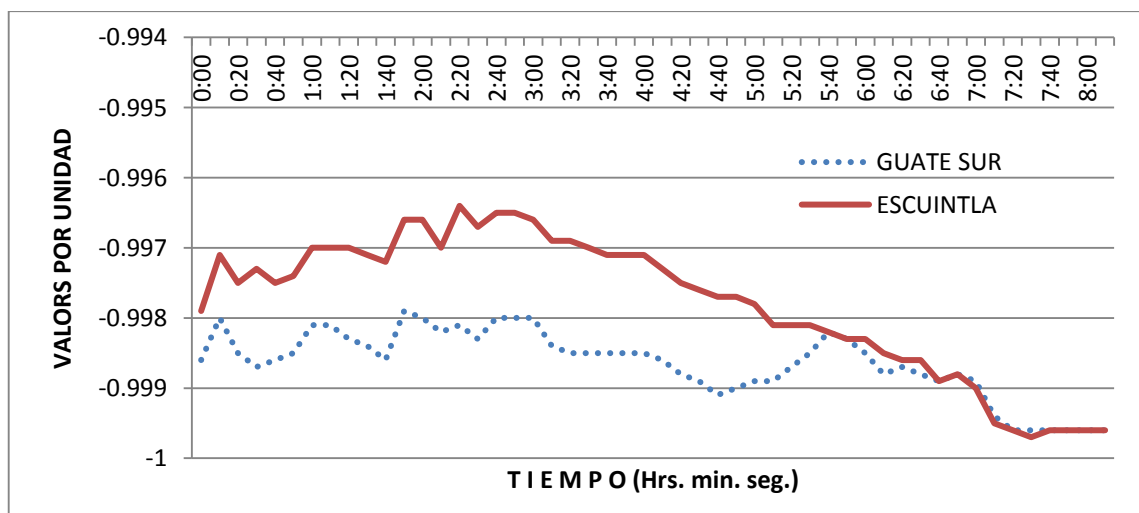
Figura 44. Factor de potencia mínima fase A



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de factor de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

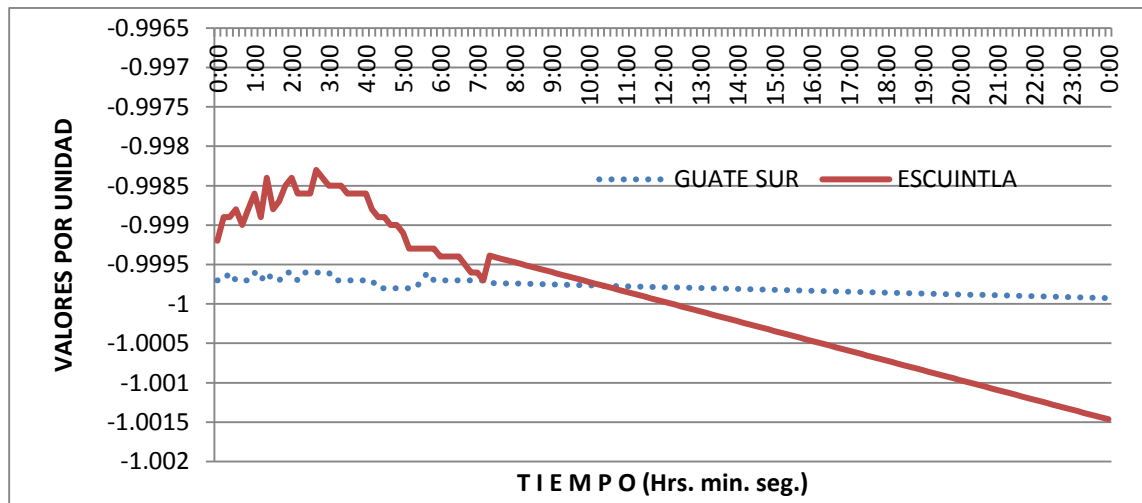
Figura 45. Diferencia de factor de potencia mínimo fase A
(Campo negativo)



Fuente: elaboración propia (2015).

Otra escala, para conocer el rango de diferencia en los extremo de la línea y ver si existen cambios relevantes.

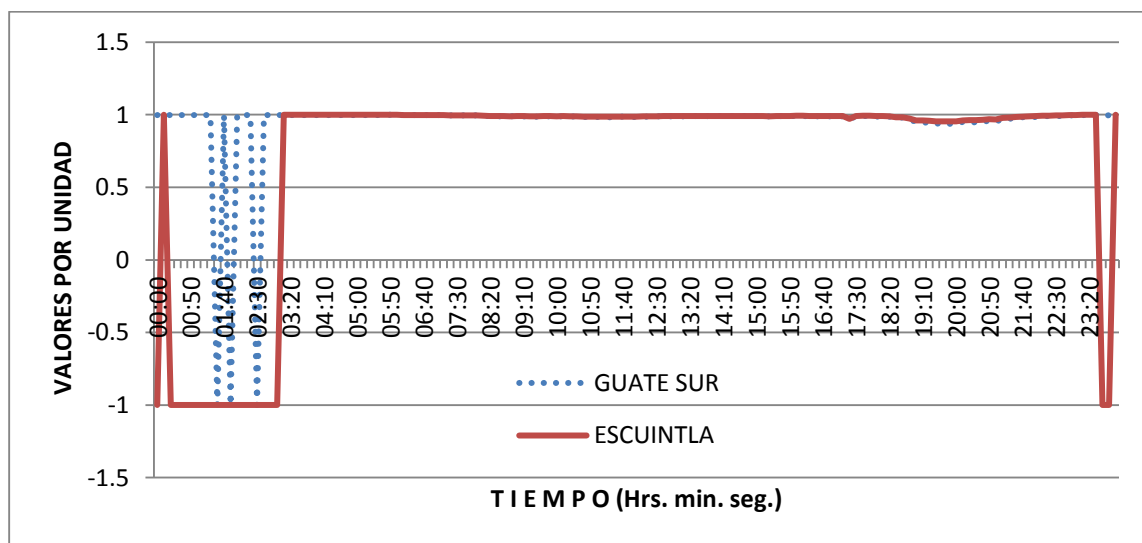
Figura 46. Factor de potencia mínimo fase B



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos del factor de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

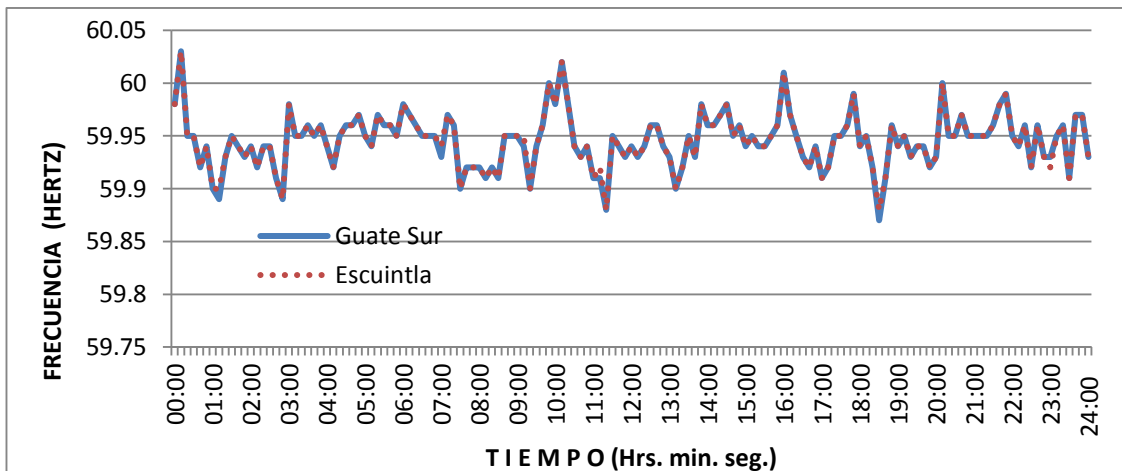
Figura 47. Factor de potencia mínimo fase C



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de factor de potencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la potencia eléctrica de la línea.

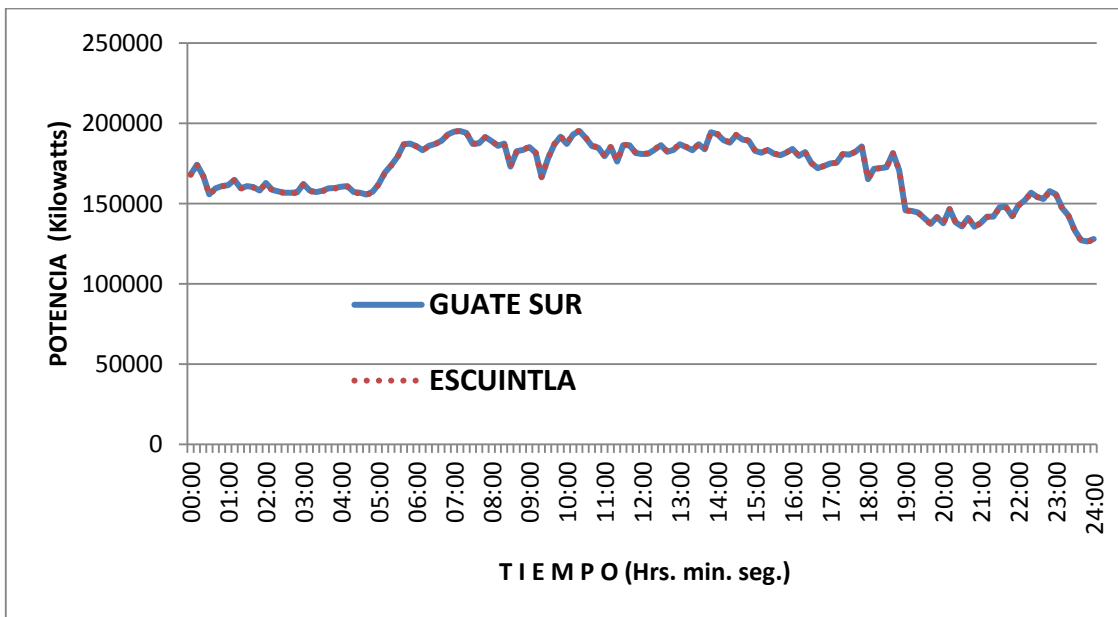
Figura 48. Frecuencia mínima total



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de frecuencia, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la frecuencia eléctrica de la línea.

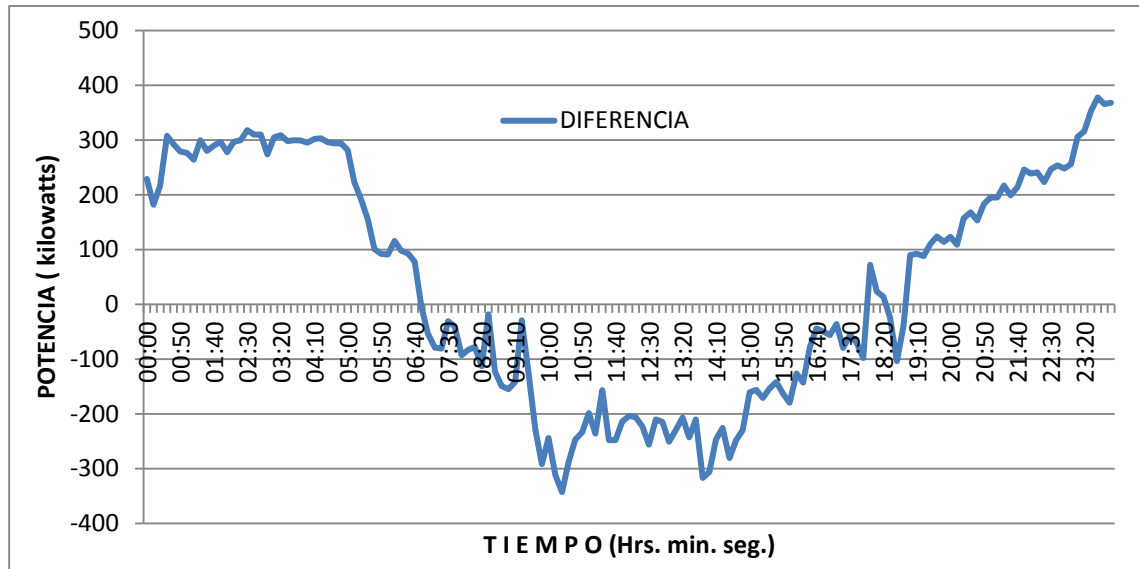
Figura 49. Demanda total



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de demanda, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la demanda eléctrica de la línea.

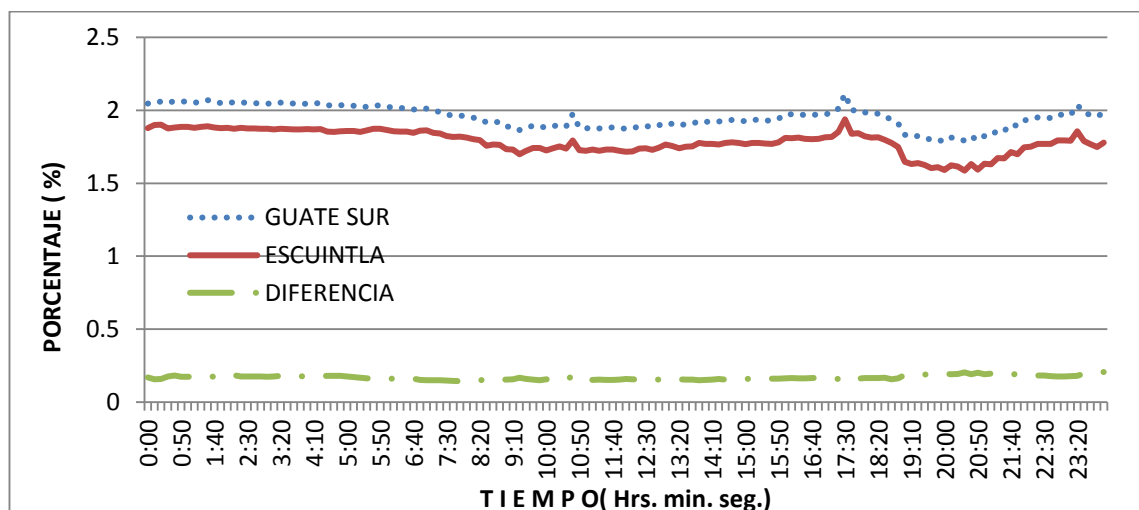
Figura 50. Diferencia de demanda total



Fuente: elaboración propia (2015).

Conocer que extremo de la línea tiene valores mayores de demanda y ver si existen cambios relevantes entre sus extremos.

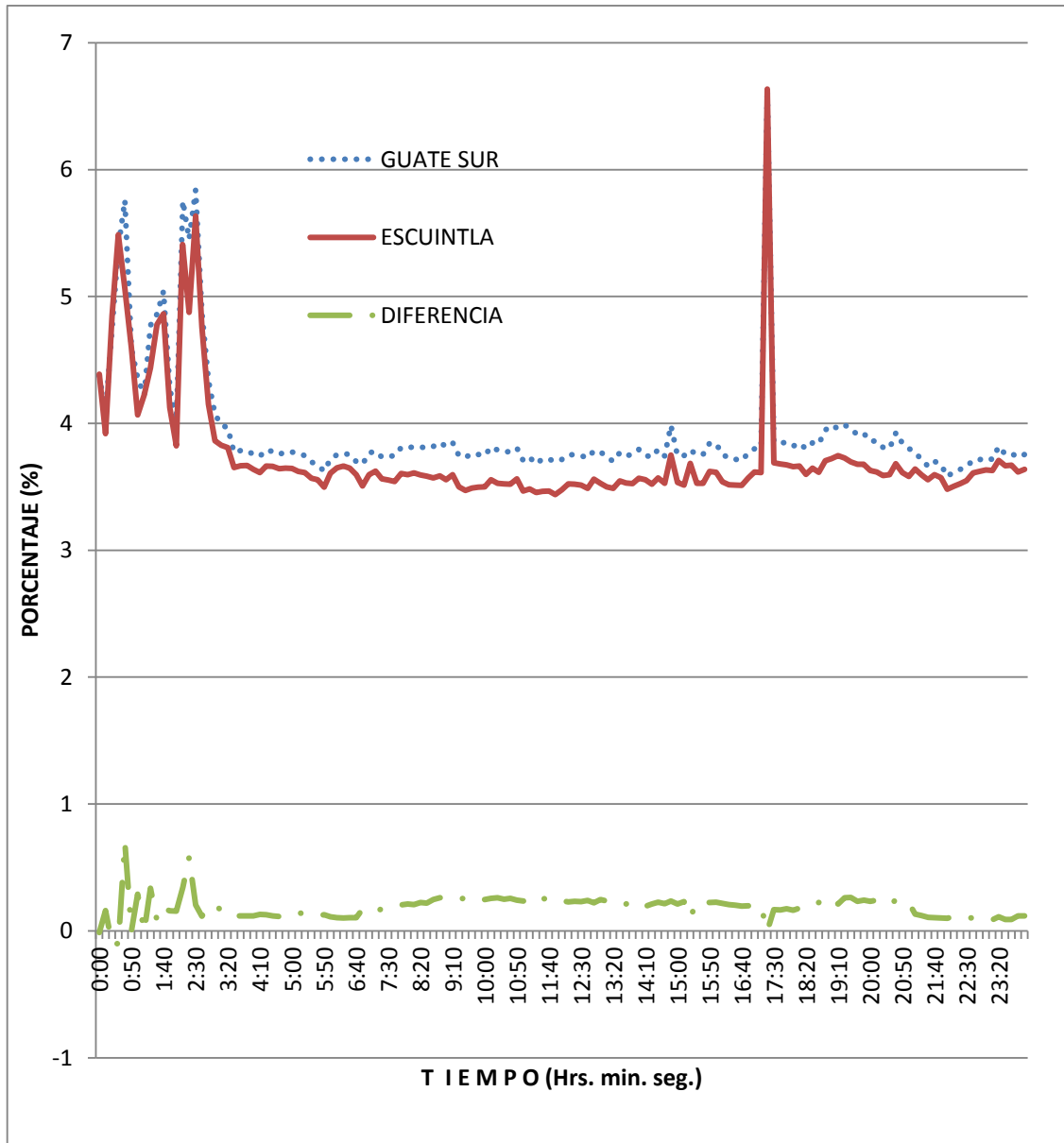
Figura 51. Corriente total desbalanceada de secuencia cero máxima con diferencia



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de corriente, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la corriente eléctrica de la línea.

Figura 52. **Corriente total desbalanceada secuencia negativa máxima**



Fuente: elaboración propia (2015).

Localizar cambios extremos o picos de corriente, así como la forma de la curva con el transcurso del tiempo durante este día y conocer la actividad de la corriente eléctrica de la línea.

CONCLUSIONES

1. La calidad de potencia energética desarrollada en este trabajo se encuentra dentro del rango de “muy buena calidad”, ya que se analizaron las tres fases A,B y C, durante 7 días, cada 10 minutos, esto a base del análisis de variación de voltaje.
2. Disturbios eléctricos encontrados, si se encuentran algunos disturbios, tanto en parámetros de potencia como en es valores de corriente, pero estos no fueron periódicos en los 7 días evaluados y corresponden a efectos producidos por agentes interconectados en las subestaciones de Escuintla y Guatemala Sur.
3. Valores de parámetros eléctricos si están dentro de los parámetros que rigen en Guatemala, por ejemplo, la frecuencia mínima fue de 59.90 Hz.
4. La eficiencia energética encontrada fue de 99.90%, resultado obtenido del análisis realizado al promedio de la potencia total, durante los siete días evaluados en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

A continuación se enumeran las recomendaciones para el presente trabajo de graduación:

1. Dar mayor atención a las líneas y subestaciones que se interconectan con la Subestación de Escuintla, así como las cargas de usuarios y plantas cogeneradoras importantes del área, ya que su interconexión tiende a modificar la calidad de potencia que se transfiere en la línea de transmisión de Escuintla – Guate sur en 230 kilovoltios.
2. En el análisis y conclusiones del trabajo se vio los efectos que produce el tipo de configuración de la línea de transmisión, por lo que es importante mejorar la diferencia de voltajes entre si y entre fases que existen.
3. Es importante mejorar la potencia reactiva en la subestación de Guate Sur y emplear un programa adecuado para la operación de la línea.
4. Realizar cálculos de sobre-potenciación, tanto del circuito 1 como el circuito 2 de dicha línea de transmisión, previendo que el crecimiento de la demanda provoque problemas en la calidad de potencia energética en un futuro inmediato.
5. Hacer estudios de calidad de potencia en los distintos puntos del sistema de interconexión eléctrica, así como en puntos de conexión con plantas generadoras y cargas importantes de usuarios, para el mejoramiento de la calidad de potencia y eficiencia eléctrica del sistema interconectado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andreas Sumper, A. B. (2012). *Electrical Energy Efficiency, Technologies and Applications*. United States: Wiley & Son Ltd.
2. Angelo Baggini, A. S. (2012). *Electrical Energy Efficiency. Technologies and Application*. . USA: Wiley & Son Ltd.
3. Barnett, R. (2012). *Power Quality Measurement and Analysis Basics*. NTT. Workforce Development Institute.
4. CONDE, M. O. (2006). *Líneas de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica*. Nuevo León: San Nicolás de los Garza.
5. Grande Turcios Nelson Manuel, R. E. (2012). *Calidad de Energía y Eficiencia Energética en Edificios, antiguo Cuscatlán, San Salvador*. Trabajo de graduación preparado para la facultad de Ingeniería y Arquitectura.
6. Kevan Hashemi.(2009-2012). *Lecturer in Physics*, recuperado de: <http://alignment.hep.brandeis.edu/Lb/XLine.html>. el 21 de 02 de 2013.
7. Melhorn. Christopher J. *Electrotek Concepys, I.* (1990). *Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements*. En C. J. Melhorn, *Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements*. Tennessee: Electrotek Concepts, Inc.

8. Mindykowski, J. (2003). Fundamentals of electrical power quality assessment. (pag.1). Dubrovnik, Croatia: XVII IMECO World Congress.
9. Smalling, A. J. (1998). *Basic Electric Power Transmission*. Tulsa, ok: Penn Well Publishing Company.
10. Tyler G. Hicks, P. (2012). *Hadbook of Energy Engineering Calculation*. United Station of America: The McGraw- Hill Companies Inc.

REFERENCIA REVISTAS

11. Santacana, Enrique T. Z. (2007). *Afinidad Eléctrica*. Revista ABB. (8-10).
12. Santacana Enrique, T. Z. (2007). *Energía para la Eficiencia. Redes eficientes energéticamente*, (1, 15,16).

ANEXOS

Equipo grabador de potencia y energía marca DRANETZ



Fuente: Manual del equipo Dranetz. (2013)

